

THÈSES

présentées à la

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE NANCY

pour l'obtention du titre de

DOCTEUR-INGÉNIEUR

par

Jean-Claude SAMAMA

Ingénieur Géologue E.N.S.G.

Première Thèse :

Exemples d'utilisation de méthodes géophysiques
et géochimiques
en vue de la détection des gisements stratiformes enfouis
(Bordure sous-cévenole ardéchoise)

Deuxième Thèse :

Propositions données par la faculté

Soutenues publiquement le 17 juin 1966 devant la Commission d'examen

JURY :

MM. M. ROUBAULT, Président

A. BERNARD } Examineurs
P. BLAZY }
P. LEYMARIE, Invité



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41551914_0031

THÈSES

présentées à la

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE NANCY

pour l'obtention du titre de

DOCTEUR-INGÉNIEUR

par

Jean-Claude SAMAMA

Ingénieur Géologue E.N.S.G.

Première Thèse :

Exemples d'utilisation de méthodes géophysiques
et géochimiques
en vue de la détection des gisements stratiformes enfouis
(Bordure sous-cévenole ardéchoise)

Deuxième Thèse :

Propositions données par la faculté

Soutenues publiquement le 17 juin 1966 devant la Commission d'examen

JURY :

MM. M. ROUBAULT, *Président*

A. BERNARD	}	<i>Examineurs</i>
P. BLAZY		
P. LEYMARIE,		<i>Invité</i>

SCIENCES DE LA TERRE, Mémoire n° 9, 88 pages, 29 fig., 7 tabl.

NANCY, AVRIL 1967

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE NANCY

Doyen : M. AUBRY

Assesseur : M. GAY

Doyens honoraires :

MM. CORNUBERT - DELSARTE - URION - ROUBAULT

Professeurs honoraires :

MM. CROZE - RAYBAUD - LAFFITTE - LERAY - JULY - LAPORTE - EICHHORN - GODEMENT
MM. DUBREUIL - L. SCHWARTZ - DIEUDONNE - DE MALLEMANN - LONGCHAMBON - LETORT -
MM. DODE - GAUTHIER - GOUDET - OLMER - CORNUBERT - CHAPELLE - GUERIN - WAHL.

Maîtres de conférences honoraires :

MM. LIENHART - PIERRET

Professeurs

MM. URION	Chimie biologique	MM. *MALAPRADE	Chimie
DELSARTE	Analyse supérieure	MANGENOT	Botanique
ROUBAULT	Géologie	GAYET	Physiologie
CAPELLE	Mécanique rationnelle	BONVALET	Mécanique appliquée
VEILLET	Biologie animale	HADNI	Physique
BARRIOL	Chimie théorique	*BASTICK	Chimie
BIZETTE	Physique	*KERN	Minéralogie
GUILLIEN	Electronique	DUCHAUFOR	Pédologie
GIBERT	Chimie physique	GARNIER	Agronomie
LEGRAS	Mécanique rationnelle	*WEPPE	Minéralogie appliquée
BOLFA	Minéralogie et cristallographie	NEEL	Chimie organique industrielle
NICLAUSE	Chimie	BERNARD	Géologie appliquée
FAIVRE	Physique appliquée	*CHAMPIER	Physique
AUBRY	Chimie minérale	*GAY	Chimie biologique
COPPENS	Radiogéologie	*REGNIER	Physico-chimie
DUVAL	Chimie	STEPHAN	Zoologie
FRUHLING	Physique	*CONDE	Zoologie
HILLY	Géologie	*WERNER	Botanique
LE GOFF	Génie chimique	EYMARD	Calcul différentiel et intégral
SUHNER	Physique expérimentale	LEVISALLES	Chimie organique
CHAPON	Chimie biologique	Mme HERVE	Méthodes mathématiques de la physique
HEROLD	Chimie minérale industrielle	MM. *GOSSE	Mécanique physique
SCHWARTZ B.	Exploitation minière	FELDEN	Physique

Maitres de Conférences

Mme BASTICK	Chimie M. P. C. (Epinal)	MM. BLAZY	Minéralogie appliquée (E. N. S. G.)
MM. GUDEFIN	Physique	JANOT	Physique M. P. C. (Epinal)
ROCCI	Géologie	JACQUIN	Pédologie et Chimie agricole
VUILLAUME	Psychophysiologie	MAINARD	Physique M. G. P.
FRENTZ	Biologie animale	CACHAN	Entomologie appliquée (E. N. S. A.)
HORN	Physique propédeutique	MARTIN	Chimie M. P. C.
LAFON	Physique (I. S. I. N.)	PAULMIER	Mécanique expérimentale
MARI	Chimie (I. S. I. N.)	N...	Probabilités et statistiques
AUROUZE	Géologie	N...	Mécanique (I. S. I. N.)
DEVIOT	Physique du solide	N...	Mathématiques
FLECHON	Physique M. P. C.	N...	Génie chimique
Mlle HUET	Mathématiques S. P. C. N.	N...	Mathématiques M. P. C.
MM. VIGNES	Métallurgie	N...	Mathématiques S. P. C. N.
BALESDENT	Thermodynamique chimique appliquée	N...	Mathématiques appliquées
		N...	Mécanique des fluides (I. S. I. N.)
		N...	Physiologie animale

* Professeur titulaire à titre personnel.



Exemples d'utilisation de méthodes géophysiques et géochimiques en vue de la détection des gisements stratiformes enfouis

(Bordure sous-cévenole ardéchoise)

"Blind ore bodies are a continuing
challenge to the mining geologist"

T. S. Lovering *et al.* 1948

AVANT-PROPOS

Lorsqu'il y a trois ans M. le Doyen M. Roubault me nomma Ingénieur de Recherches pour collaborer à un programme d'Action Concertée approuvé et financé par la Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique, j'étais loin de me douter d'avoir un jour à aborder un problème de prospection pure. Mais le thème même de cette recherche -l'étude des minéralisations stratiformes de plomb et de zinc sur la bordure du Massif Central- amenait nécessairement la prise en considération de la détection des gisements enfouis.

Après m'avoir enseigné au cours de ma scolarité à l'Ecole Nationale Supérieure de Géologie les bases scientifiques nécessaires à l'entreprise de tout travail géologique, M. M. Roubault me conviait donc à résoudre un problème pratique qui s'est avéré passionnant ; je lui en suis infiniment gré.

Dans la démarche hésitante qui va du doute à la destruction d'une doctrine en vigueur puis à l'élaboration et la vérification d'une théorie nouvelle, M. A. Bernard qui avait la responsabilité scientifique du programme de travail s'est avéré être à la fois un interlocuteur et un guide, exigeant tout aussi bien le bon sens que la rigueur d'une démonstration ou la vérification directe d'un résultat. Je tiens à lui manifester ici ma reconnaissance et mon respect.

Nombreux sont ceux dont l'aide me fut précieuse et tout particulièrement M. P. Leymarie qui, par sa collaboration directe puis par ses corrections m'obligea beaucoup ; je lui en suis vivement reconnaissant.

Cependant, malgré tout, sans la possibilité d'exploiter les campagnes de prospection et l'autorisation d'en faire état ici, ce mémoire n'aurait pas vu le jour. C'est à l'extrême libéralité de la Direction de la Société Minière et Métallurgique de Peñarroya, tant sur le plan de l'utilisation des données que sur celui, plus matériel, de la publication, que cette réalisation s'avéra possible. MM. F. Fogliérini, R. Féleuc et P. Rogel, m'aidèrent tout particulièrement en apportant arguments, objections ou contradictions au cours de l'élaboration de ce travail. Leur collaboration me fut très précieuse.

Je tiens enfin à remercier ici tout le personnel de l'Ecole Nationale Supérieure de Géologie qui m'aida avec gentillesse et compétence à présenter correctement ce mémoire.

RÉSUMÉ

La reconnaissance minière de la couverture mésozoïque de la bordure sud-est du Massif Central pose de façon aiguë le problème de la détection des gisements aveugles liés aux strates.

Parmi les techniques de détection couramment utilisées et retenues en fonction des connaissances acquises sur la distribution des concentrations de ce type, la gravimétrie et la géochimie tactique font l'objet d'une étude critique réalisée d'après les résultats obtenus sur le gisement de Largentière (Ardèche).

La gravimétrie, utilisée de manière indirecte, c'est-à-dire dans le but de détecter des structures connues pour être fréquemment le site de tels gisements liés aux strates, se heurte à des difficultés qui en limitent l'emploi à des cas particuliers dont les caractères sont énoncés.

L'emploi de la géochimie tactique repose sur le phénomène dit d'anomalie de fuite : qu'elle qu'en soit la cause, les failles qui traversent en profondeur un amas lié aux strates, présentent à l'affleurement et dans son environnement immédiat des anomalies de teneur en métaux lourds. L'analyse d'exemples soigneusement sélectionnés pour l'étude de ce phénomène permet d'en reconnaître la réalité et de dégager les possibilités d'emploi de la géochimie tactique.

En conclusion, la considération des préliminaires d'emploi et des limites définies par interprétation des résultats, permet de situer l'utilisation rationnelle de ces techniques dans l'ébauche d'une organisation méthodique des prospections des gisements liés aux strates.

INTRODUCTION

De la récolte primitive des métaux natifs au complexe minier moderne, les données essentielles de la phase initiale de l'industrie minérale, la prospection, ont subi des transformations fondamentales, presque des mutations. L'épuisement des gisements affleurants, l'augmentation considérable des besoins industriels en matière première, la nécessité économique de développer les exploitations dans des pays où la stabilité politique garantit l'amortissement des investissements imposent ou imposeront bientôt à l'ingénieur de prospection de trouver, dans le sous-sol de périmètres géographiquement définis, des gisements exploitables. Certes, la notion d'exploitabilité a parallèlement considérablement évolué, mais l'abaissement fantastique des teneurs-limites, la récupération de plus en plus payante des sous-produits en traces dans les minerais, l'introduction de méthodes d'extraction en masse, modifient de la même manière la notion géologique de gisement de minerai sans que cette nouvelle définition facilite, tant s'en faut, la tâche du prospecteur.

En fait, c'est à une course poursuite après cette inopérante définition que se livrèrent et que se livrent les prospecteurs. Aussitôt que leur connaissance géologique s'avéra suffisante pour élaborer des méthodes de prospection étayées par un arsenal de techniques d'emploi plus ou moins coûteux, aussitôt l'économiste et l'exploitant minier réclamèrent la découverte de ressources différentes, et d'une manière générale, de plus en plus localisées par des impératifs économiques et politiques.

Ainsi que le reconnaît T. S. Lovering (1948), la détection des corps minéralisés aveugles pose un défi permanent au géologue minier et les découvertes des gisements de ce type relèvent, jusqu'à présent, davantage d'heureux hasards que de moyens de détection infaillibles ou d'une méthodologie de la prospection suffisamment élaborée et présentant, entre autre, une organisation économiquement hiérarchisée des moyens et des techniques en fonction des dimensions et de la valeur de l'objectif enfoui. Ce défi que posent les gisements aveugles, défi que relèvent depuis plus de cinquante ans, dans un contexte économique différent toutefois, les géologues pétroliers, dut être pris très sérieusement en considération par les géologues miniers.

C'est dans l'intention d'inscrire ce mémoire comme une contribution, sur un cas particulier, au vaste effort de recherche entrepris un peu partout dans le monde que ce travail fut abordé et poursuivi pendant quatre années sur ce thème.

Sur un plan très général, le problème de prospection comporte trois questions essentielles :

- quel est le lieu à prospecter ?
- quel est l'effort financier à consentir ?
- quels sont les moyens à mettre en œuvre ?

a) Le lieu : c'est-à-dire la région susceptible de fournir après exploration et exploitation un profit notable (1) est une notion demeurée vague et empirique malgré de récents efforts.

En pays bien exploré, il se dégage des lois de distribution des gisements minéraux (Blondel, 1934 et 1951) et en d'autres lieux, ces lois permettent d'attribuer une valeur à la probabilité de découverte dans un domaine bien défini.

Les gisements, qui sont des concentrations anormales en un ou plusieurs éléments sont caractérisés par la distribution des teneurs élémentaires. Or la répartition des teneurs n'est pas un phénomène aléatoire, mais bien, au contraire, il existe une régionalisation -au sens statistique du terme (Matheron, 1962)- de leur distribution : la probabilité de rencontrer une teneur donnée en un point est fonction des teneurs observées à proximité.

(1) Cette notion doit être cependant nuancée par certaines considérations : approvisionnement d'une industrie, indépendance stratégique, ou bien option économique.

Quelle que soit l'importance des lois relatives aux teneurs, pour le prospecteur et le métallogéniste, elles laissent néanmoins le pas à celles qui concernent les accumulations métal. Sur ce plan, des lois se sont dégagées et il semble bien que "les lois de répartition géographique ne sont pas une vue de l'esprit" (Blondel, 1951) et qu'une quasi-périodicité apparaisse au sein de certains domaines d'apparence homogène.

b) Les efforts financiers à consentir, toujours dans l'esprit d'un profit, dépendent non plus de la probabilité de découverte d'un gisement, mais de celle d'un gisement d'une valeur donnée. Les efforts, en particulier ceux de T.B. Nolan (1936, 1950), de F. Blondel (1956), d'A. Alais (1956) et de F. Blondel et E. Ventura (1956) permettent de fixer les limites des investissements de prospection dès que l'on s'attaque à des surfaces suffisamment vastes pour que les lois statistiques établies puissent s'appliquer.

Il est donc possible de définir et de préciser les zones de l'écorce terrestre où les probabilités de découverte sont les plus favorables, et de fixer la limite des efforts à consentir.

c) Le problème des moyens à mettre en œuvre est peut-être mieux défini que les précédents mais il y règne cependant une certaine confusion due aux différentes échelles de travail. La littérature abonde de publications sur l'organisation générale des prospections, de monographies détaillées et de traités spécialisés. Mais avant tout chose, une remarque s'impose : le stade d'avancement des travaux est fondamental dans le choix des méthodes et des objectifs. F. Blondel (1942, 1950) distingue trois étapes : l'exploration, la reconnaissance et la prospection :

- l'exploration concerne de vastes régions où aucun gisement d'un métal donné n'est connu.
- la reconnaissance cherche à localiser, au sein d'un domaine favorable, les sites à reconnaître en premier.
- la prospection s'attache à l'étude de détail des sites préférentiels.

Cette terminologie est loin d'être universelle (Vigier et Murard, 1956) mais l'usage semble bien l'imposer. A chaque stade se relie à la fois la notion de surface d'investigation et celle de méthodes spécifiques : c'est ce que J. Fortescue (1965) nomme "l'architecture" de la prospection.

Très schématiquement, l'arsenal des méthodes disponibles se divise en méthodes directes et indirectes, les premières cherchant l'observation directe d'une accumulation métallifère exploitable, les autres s'efforçant de déterminer la localisation de corps (ou de volumes) minéralisés par les propriétés (physiques, chimiques ou géologiques) d'environnement où ces minéralisations se trouvent, statistiquement, situées.

Que ce soit au travers du stade d'avancement des travaux (exploration, reconnaissance ou prospection) ou au travers des types de méthodes préconisées ou bien encore au travers de la combinaison de ces deux aspects (l'architecture de J. Fortescue), trois types de problèmes s'individualisent (1) :

- la recherche de minerais d'utilisation nouvelle,
- la recherche de minerais communs en pays vierges,
- la détection de gisements enfouis.

Au vu des développements historiques de l'exploration minérale et de son accélération constante, il faut bien convenir que les investigations directes sont, sinon révolues, tout au moins très insuffisantes : les minerais d'utilisation nouvelle, hormis l'exemple de l'uranium, posent des problèmes restreints et l'exploration des pays vierges touche à sa fin. Les gisements enfouis prennent chaque jour plus d'importance et il s'avère indispensable de se forger les outils nécessaires à leur détection. Malgré les progrès accomplis en ce domaine au cours des dernières décennies, rien de décisif ni d'absolu n'a été obtenu.

Le problème est vaste, aucune solution définitive n'existe et ne peut exister, mais loin de se décourager de cette situation, il faut bien au contraire s'efforcer de faire le point de l'efficacité et des modalités d'emploi de méthodes encore expérimentales en ce domaine comme la gravimétrie et la géochimie tactique appliquées à des cas bien définis et particulièrement propices, ici la zone plombo-zincifère de Largentière (Ardèche). C'est à la Société Minière et Métallurgique de Peñarroya que revient le mérite d'avoir, dans un effort particulier de modernisation des idées et des techni-

(1) D'après une note inédite de A. Bernard.

ques de recherche minière, établi et réalisé le vaste programme de prospection dont l'analyse critique est entreprise ici.

La détection des gisements stratiformes aveugles de plomb et de zinc du Trias ardéchois est plus un problème de reconnaissance que de prospection : les surfaces offertes aux investigations correspondent aux caractéristiques de ce stade de la recherche et le but est de sélectionner les sites favorables à prospector en premier.

Ce n'est plus un problème d'exploration car la recherche et l'exploitation ont de tout temps -et à juste titre- démontré le caractère éminemment favorable du Trias sous-cévenol, et la découverte récente du gisement de Largentière dans cette formation confirme ce point de vue.

Le problème prend toute son ampleur pour des constatations géologiques évidentes : la structure régionale ménage pour tout affleurement du Trias, un mince liséré (parfois cependant dédoublé) (figure 1), alors que sous la couverture sédimentaire plus récente, un vaste domaine demeure inexploré et peut fort bien contenir plusieurs gisements importants. Jusqu'ici seuls les domaines d'affleurement ont fait l'objet d'investigations détaillées.

Ainsi se trouve exprimé le problème de la détection par des méthodes indirectes des gisements aveugles du Trias ardéchois : *comment reconnaître et prospector un important volume qui échappe à l'observation directe ?* Deux attitudes sont possibles :

- recréer l'observation directe : le sondage,
- mettre en évidence un caractère particulier du gisement ou de son contexte.

Le seul moyen d'investigation précise et directe est, sans conteste possible, le sondage, mais la simple comparaison du volume d'un gisement à celui du volume à prospector est tel qu'il conduit à une multitude de sites à reconnaître et à une impossibilité économique (1). Toutefois, en substituant au volume d'un gisement celui de son enveloppe géochimique, on réduit sensiblement, dans le rapport des 2 volumes, le nombre de sites possibles. Par malheur, le développement des anomalies autour d'un gisement est un phénomène très irrégulier et les exemples d'anomalies négatives autour d'une concentration minérale viennent jeter un doute sur la validité de cette attitude. Le problème général de la maille du réseau d'implantation de sondages est complexe ; cependant pour l'aborder, L.B. Slichter (1955) s'efforce de définir statistiquement, dans un cadre métallogénique donné, le rendement financier d'un réseau de sondages à maille régulière : à maille trop large, la campagne a fort peu de chance de succès, à maille trop réduite, elle devient prohibitive. C'est une attitude rationnelle qui nécessite la connaissance approfondie de la géologie minière régionale ; mais la démarche de recherche systématique par sondage est, même dans ces conditions, en général beaucoup trop lourde eu égard aux possibilités financières normales. Il est donc primordial de posséder une méthode efficace de sélection des sites à inventorier et de faire suivre à la reconnaissance minière une évolution comparable à celle de la prospection pétrolière qui a réussi à réduire dans des proportions considérables, le pourcentage de sondages de reconnaissance qui s'avèrent stériles.

L'arsenal des idées, moyens et techniques est immense, mais cette débauche de possibilités ne reflète que le peu de généralité des différents procédés : les techniques absolues, polyvalentes n'existent pas ; les exemples de prospection se présentent presque tous comme des cas particuliers et une méthode ici employée avec succès peut s'avérer là totalement inefficace. Ce pessimisme ne reflète cependant qu'un certain état actuel où les problèmes deviennent chaque jour plus complexes et où très souvent les analyses des exemples sont extrêmement incomplètes, en particulier sur le plan géologique. Or qu'y a-t-il de commun entre plusieurs exemples sinon les données géologiques ?

L'exemple dont l'analyse est entreprise ici ne peut prétendre à la généralité et reste bien un cas d'espèce. Mais l'extension du problème est telle que des exemples très voisins doivent apparaître et qu'à partir de leur analyse comparée s'élaborera une logique de détection de ce type de gisement.

Mais comment, dans un cas particulier, choisir la démarche efficace ? Deux attitudes se sont fait jour successivement. Initialement les prospecteurs tentaient l'application simultanée dans un secteur donné de toutes ou presque toutes les méthodes possibles dans l'espoir que l'une d'entre elles s'avèrerait efficace : c'est ce que J. Fortescue (1965) appelle "shotgun approach", principe

(1) Pour obtenir une forte probabilité de détection (0,80) d'un gisement de la taille de celui de Largentière, il faudrait un réseau régulier de 4 sondages au km². Les permis de recherche actuels couvrent environ 280 km² c'est donc plus de 1 000 sondages que nécessiterait l'application de ce principe.

auquel s'oppose "designed approach" où l'étude raisonnée des facteurs liés à la minéralisation et susceptibles d'être mis en évidence, devient primordiale. C'est dans cet esprit qu'ont été sélectionnées trois méthodes bien distinctes applicables au Trias ardéchois : l'étude géologique, la géochimie et la gravimétrie.

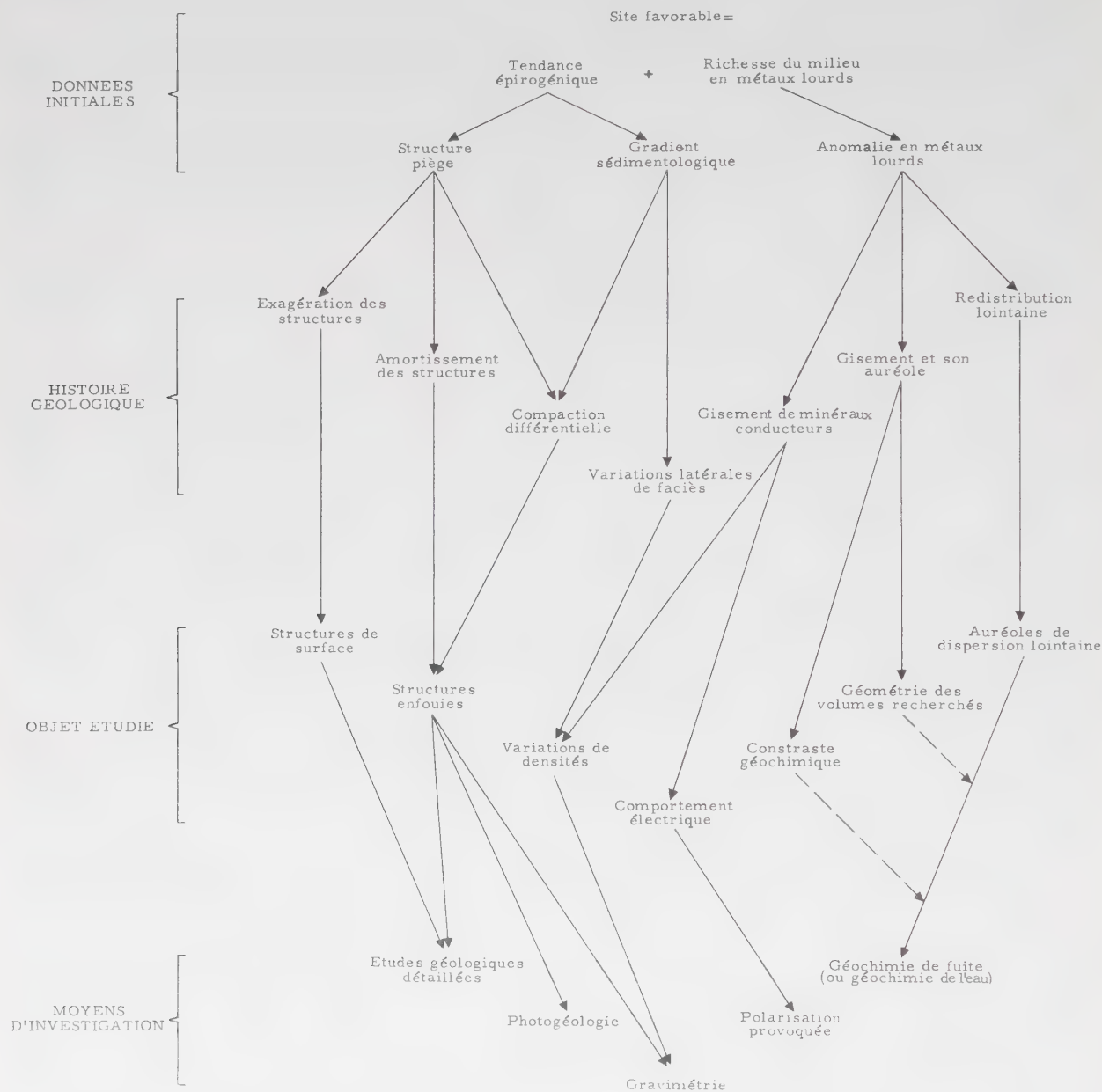


Tableau I - Schéma de l'enchaînement entre les données géologiques et les modes de prospection.

Pourquoi un tel choix au milieu de toutes les possibilités offertes ? Avant toute chose, il faut parfaitement préciser les caractéristiques de l'objet recherché, le gisement, et là, les considérations théoriques sont indispensables. Vouloir rechercher un gisement stratiforme en se guidant sur les failles nourricières conduit à des échecs ou, pour le moins, à des efforts exagérés et dispendieux (les annales sont là pour en témoigner) alors qu'une autre idée directrice, la recherche de structures par exemple, serait infiniment plus féconde. Il n'est pas pour autant nécessaire de

verser dans l'attitude inverse et de donner trop d'importance à une théorie génétique : *le caractère éminemment favorable des domaines de mouvements contemporains de la sédimentation est un fait acquis* au même titre que la localisation du pétrole dans les anticlinaux, et les raisons de ces concentrations important peu à ce stade d'investigations : la structure syn-sédimentaire est un objet qu'il faut s'efforcer de détecter et de localiser.

D'une façon très générale (Tableau I), les sites favorables d'un domaine épicontinental résultent de la conjonction d'une tendance épirogénique nette à une époque donnée et d'une richesse en métaux du milieu de sédimentation à cette même époque. Ces principes fondamentaux s'inscrivent dans les séries par l'existence de structures pièges, d'un fort gradient sédimentologique(1) et d'une anomalie en métaux lourds. Mais le devenir géologique transforme ces données initiales : c'est la suite logique des conditions premières (exagération des structures ou leur amortissement, compaction différentielle), alors que les éléments lourds se redistribuent en fonction des nouvelles conditions physico-chimiques qui définissent le milieu.

De l'ensemble des données géologiques actuelles, seules certaines peuvent être sélectionnées comme objets d'une prospection de gisements aveugles : objets structuraux, objets physiques et objets chimiques. De ces objets, certains paraissent plus propices à une recherche et à une localisation. Ce sont : les structures (enfouies ou superficielles), les variations de densité, les modifications de la conductivité des roches, les phénomènes de répartition des éléments chimiques. Les *études géologiques, photogéologiques, gravimétriques, électriques ou géochimiques* peuvent prétendre les révéler.

- Une campagne de prospection sans étude géologique parallèle est presque à coup sûr vouée à l'échec car ce n'est que par l'analyse minutieuse des exemples régionaux qu'il est possible d'aller du connu vers l'inconnu, des gisements affleurants vers les gisements aveugles.

Les études géologiques destinées à détecter des gisements stratiformes aveugles forment un ensemble complexe qui ne sera pas retenu ici, non que ce moyen d'investigation soit peu fertile, loin de là, mais c'est là un sujet bien trop vaste pour pouvoir être inclus dans le présent mémoire. Seul un aperçu sommaire nécessaire à l'abord des problèmes sera donc esquissé.

- La photogéologie apparaît comme un moyen d'investigation très souple et adaptable à différents échelons des études (Gérards et Ladmirant, 1960, 1963) : étude géologique détaillée, étude structurale (structures de surface ou structures enfouies...) ; plutôt que de la considérer comme technique particulière, il apparaît préférable d'appliquer tous ses résultats aux autres moyens d'étude.

- La gravimétrie est une méthode de choix classique pour la détection des structures enfouies : elle peut efficacement aider à l'interprétation des structures tectoniques affleurantes alors que son application directe aux variations de densités que ménagent les changements de faciès et la présence de minéraux denses peut être féconde.

- La polarisation provoquée permet de localiser des anomalies dues à des associations de minéraux conducteurs non jointifs et à ce titre doit s'appliquer aux gisements de galène du Buntsandstein ardéchois. Plusieurs études directes sur le site de Largentière sont en cours : la méthode en est encore cependant à une phase d'essai et de mise au point, et il n'est pas possible d'en apprécier l'efficacité.

- L'aspect géochimique du problème est double : les auréoles géochimiques d'un gisement et ses migrations épigénétiques, les fuites. La première méthode s'apparente plus par ses méthodes et techniques, aux travaux géologiques et sédimentologiques qu'à des investigations géochimiques de surface : c'est en effet à partir des sondages et des affleurements lointains de la "couche porteuse" (Knight, 1957, Fuchs, 1963) que cette démarche peut être suivie. Pour ces raisons, seule la fuite sera examinée ici.

Cet aspect du problème est en effet original : depuis quelques années il est apparu que la fracturation d'un gisement stratiforme a pu s'accompagner d'une migration verticale importante des métaux lourds et que la prospection de surface peut révéler des anomalies significatives d'amas sous-jacents. Cette méthode semble *a priori* très propice à la solution des problèmes posés, car simple et peu onéreuse, elle paraît suffisamment "intégrante" pour éliminer les phénomènes secondaires et ne sélectionner que les sites favorables.

(1) Le gradient sédimentologique est un concept qui généralise au cas général des variations sédimentaires, quelle qu'en soit la nature, la notion de gradient d'isopaque d'une formation, c'est-à-dire le taux moyen de variation de puissance entre deux points. Par extension, et d'une façon plus ou moins rigoureuse, on peut définir les taux de variations de granulométrie, de teneur en insolubles, de dolomitisation, etc...

L'angle utilitaire sous lequel est présenté cette analyse n'est cependant qu'un volet du problème car l'aspect théorique des questions abordées est presque aussi important, même si les résultats n'ont pas, au stade d'aboutissement actuel, la même portée. C'est d'ailleurs précisément l'aspect théorique de certains problèmes (structure régionale, géochimie des séries de couverture, évolution épigénétique des gisements) qui a incité à entreprendre ces investigations ; si la présentation adoptée ici est celle d'un problème de prospection, c'est que l'aspect théorique s'avèrait incomplet et de moindre portée.

De la présentation de ces travaux il ressort une certaine disproportion qui correspond plus à l'importance des résultats acquis et à la difficulté éprouvée dans l'abord des sujets, qu'au volume même du travail réalisé ; ces deux aspects du même problème de prospection avaient initialement la même importance et les conclusions, qu'elles soient positives ou négatives, qu'elles conduisent à condamner, nuancer ou confirmer les possibilités d'une méthode s'inscrivent, de toute façon, dans le plan de recherche d'une logique de détection des gisements stratiformes enfouis.

APERÇU GÉOLOGIQUE

La couverture sédimentaire mésozoïque qui est l'objet des prospections étudiées ici est des plus simples dans ses grandes lignes, aussi bien sur le plan de la stratigraphie que sur celui de la tectonique.

Elle présente les caractères normaux d'une série épicontinentale à tendance générale transgressive dont les oscillations et les anomalies sont intimement liées à des mouvements épirogéniques, soit locaux soit régionaux, qui contrôlent les modalités des transgressions et régressions.

1 - LITHOSTRATIGRAPHIE

En discordance soit sur le socle cristallin et cristallophyllien hercynien, soit sur les formations sédimentaires stéphaniennoises ou permiennoises apparaît la série à dominante détritico du Trias. Le jeu combiné de la tectonique et de l'érosion ne ménage qu'un mince liseré d'affleurement (figure 1) bordant les Cèvennes et ce n'est qu'à la faveur d'accidents transverses que quelques lambeaux sédimentaires renseignent sur l'extension et les variations latérales de cette formation.

La première unité lithostratigraphique, la formation détritico de base (40 à 50 m de puissance) est composée d'arkoses et de grès arkosiques grossiers à fins, grossièrement granoclassés et à ciment très variable. Cette unité est attribuée au Buntsandstein. Le faciès en est soit continental, soit lagunaire et c'est précisément à la limite de ces deux domaines qu'apparaît, exprimé dans le ciment, l'essentiel de la minéralisation connue : le gisement de Largentière (galène et blende).

Puis apparaît une unité argilitico et carbonatée (35 à 50 m en moyenne) qui se charge vers l'Est en évaporites tout en augmentant considérablement de puissance. Il semble au vu des découvertes paléontologiques extrêmement rares que cette formation corresponde au Muschelkalk sans que les limites exactes de cet étage puissent pour autant être précisées.

Au-dessus, les épandages d'argilites bariolées, et d'arénites siliceuses (150 à 180 m) correspondent sans doute au Keuper. Quelques traces de minéralisation (galène) y sont connues mais le phénomène est sans commune mesure avec les concentrations sous-jacentes.

L'analogie de cette trilogie avec celle du Trias de type germanique est quelque peu illusoire et la valeur stratigraphique des subdivisions restera incertaine tant qu'aucune datation précise ne sera établie.

Bien que mal connu, le Rhétien, caractérisé par une faune sporadico d'*Avicula contorta* PORT, semble assez constant mais les variations de faciès et son analogie avec le Keuper (Samama, 1966) rendent son identification pour le moins délicate et très souvent impossible.

Le Lias inférieur présente de nombreuses et importantes fluctuations de faciès et de puissance (Fabre, 1893 ; Elmi, 1964 ; Elmi et Mouterde, 1965), mais à l'intérieur du cadre géographique de cette étude, les faciès de l'Hettangien (dolomie avec quelques niveaux d'argilites) et celui du Sinémurien (calcaire à chailles) restent constants.

Les termes supérieurs du Lias et ceux du Jurassico moyen et supérieur n'interviennent pas dans l'étude entreprise ici.

2 - TECTONIQUE

La couverture sédimentaire ainsi définie est affectée de trois types de mouvements : un basculement général vers le Sud-Est ; des plissements à plus ou moins large rayon de courbure ; une série de réseau de failles.

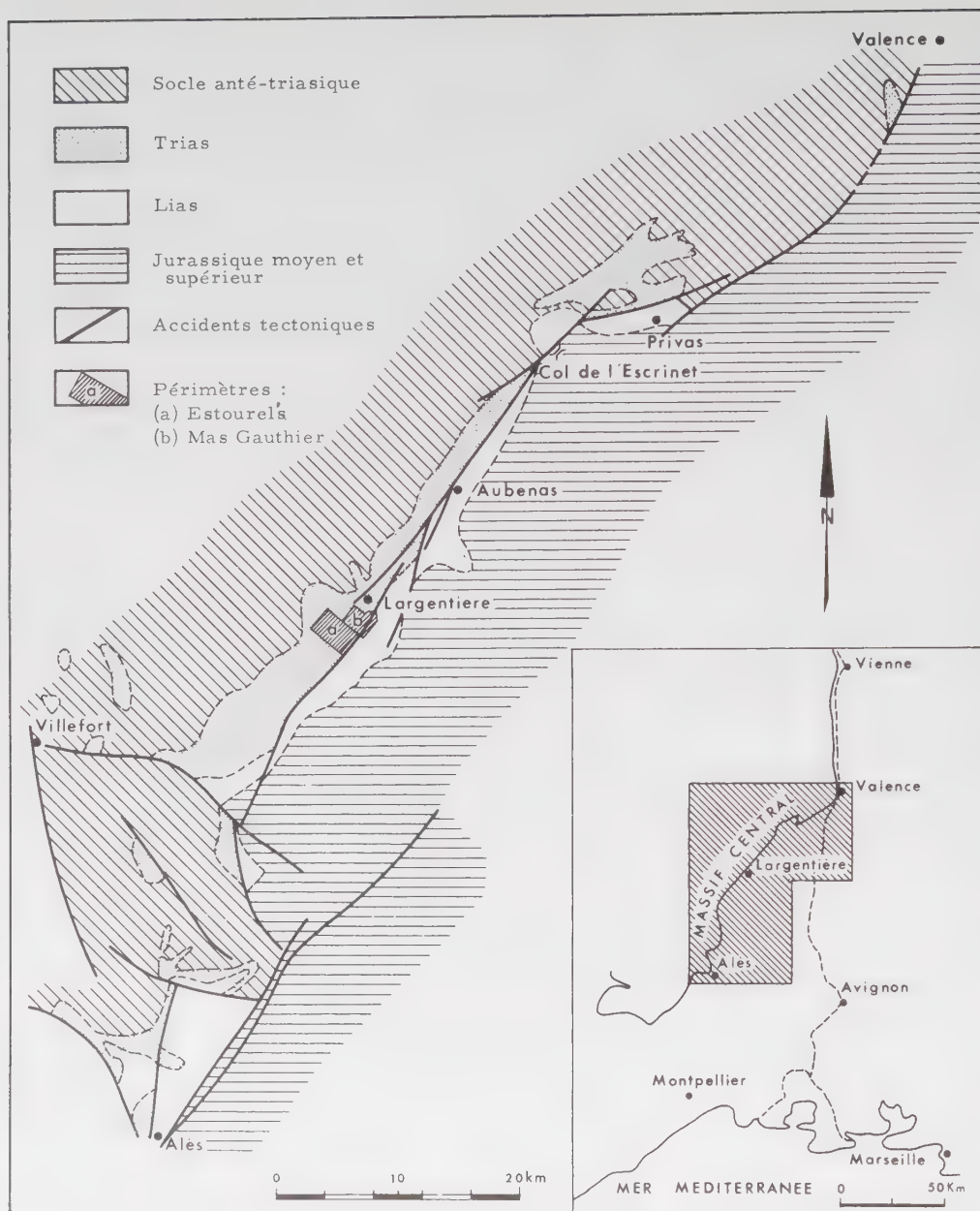


Figure 1 - Carte géologique schématique, avec situation des travaux.

-a) Le basculement général de la couverture sédimentaire est un trait constant de tout le domaine ardéchois. Seule, l'intensité et, dans une moindre mesure, la direction des pendages varient quelque peu.

Très localement, des inversions de pendages traduisent soit des structures anormales du socle, soit des contrecoups d'effondrements locaux.

-b) A la tectonique cassante qui est de règle, s'oppose des phénomènes de plissements à rayon de courbure très variable qui apparaissent à proximité d'accidents majeurs dès que le tégument sédimentaire devient plus souple (développement de niveaux argileux) et plus puissant. Aucun accident de ce type n'apparaît dans des séries antérieures au Lias moyen.

-c) Les différentes séries de failles compartimentent cette couverture sédimentaire et on distingue 3 réseaux distincts (Fogliérini *et al*, 1965) : le réseau cévenol (Nord 20° Est) ; le réseau transverse (Nord 30° Ouest) ; le réseau Nord-Sud.

L'âge du dernier et principal rejeu de ces accidents est alpin. Il est difficile mais néanmoins possible de préciser localement cette datation (voir chapitre géochimie). Mais, de fait, la grande majorité de ces accidents a joué un rôle important dans la sédimentation, notamment au Muschelkalk, en créant des dénivellations locales importantes qui se traduisent par des variations de faciès et de puissance rapides et des brèches intraformationnelles. Ce dernier témoin tectonique permet de retrouver les deux principales directions (cèvenole et transverse) qui sont toutes deux très précoces (Bernard et Samama, 1965).

3 - MINERALISATIONS

En liaison indiscutable avec la tectonique précoce et corrélativement avec les variations sédimentologiques qui en dérivent, les minéralisations plumbo-zincifères sulfurées apparaissent dans la série détritique de base et accessoirement dans la série argilo-carbonatée qui la surmonte.

-a) Dans le Buntsandstein, la minéralisation apparaît en lentilles diffuses réparties au sein de 5 couches repérées lithostratigraphiquement. La majeure partie du tonnage reconnu à Largentière est localisée dans une structure dissymétrique d'effondrement orientée Nord 30° Ouest et, par analogie, la recherche de structures identiques est considérée comme un objectif premier des prospections locales et régionales.

-b) Très secondairement, des lentilles minéralisées riches mais de faible extension ont été reconnues dans le Muschelkalk. Ces lentilles sont à dominante zincifère et sont toujours associées au niveau carbonaté.

L'essentiel du stock-métal apparaît en ciment au sein des roches-supports et le reliquat consiste en remplissages de diaclasses et failles qui ne sont toutefois minéralisées qu'au passage des "couches porteuses". Ces filons peuvent être considérés comme des accidents tectoniques "nourris" à partir des concentrations sédimentaires syngénétiques (Fogliérini *et al*, 1965), et représentent un phénomène comparable à celui décrit par les géologues allemands pour le Mansfeld sous le nom de "rücken".

Ainsi se présente le cadre géologique, objet des présentes investigations. Il convient de relever dès maintenant deux faits essentiels : la localisation des minéralisations au sein de structures contemporaines de la sédimentation et le développement des migrations épigénétiques dans les fractures. Ces deux aspects particuliers sont à la base même des prospections telles qu'elles ont été conduites dans les formations triasiques ardéchoises.

Première Partie

GRAVIMÉTRIE

A - INTRODUCTION

Parmi les méthodes d'investigation, la gravimétrie tient une place de choix dans la détection des structures profondes, ou plus précisément dans l'étude de la répartition des densités de l'écorce terrestre. Cependant l'interprétation d'une anomalie du champ gravifique se heurte à une difficulté théorique grave : plusieurs distributions des densités peuvent se traduire par un même champ extérieur, le problème est donc fondamentalement indéterminé. Mais cet obstacle, théoriquement insurmontable peut, en fait, être partiellement contourné par l'adjonction de certains paramètres géologiques : structures plausibles, répartition de densité, limites de profondeur des corps perturbateurs... Et en de très nombreux cas une solution unique apparaît : les exemples historiques de prospection gravimétrique du pétrole ont confirmé toute la valeur de cette méthode.

Mais à côté des plus brillants exemples de succès, des échecs complets sont enregistrés, la campagne de Largentière en est un : jusqu'ici aucune corrélation entre anomalies et structures ou amas de minerai n'est apparu. Pourquoi alors un tel développement sur cette méthode ? Le but en est double : d'abord tout échec exige la recherche et l'analyse des causes même de l'insuccès, ensuite, c'est la réalisation de ce travail qui a contraint à abandonner les dernières illusions sur la valeur des résultats, illusions jusqu'alors entretenues par des considérations qualitatives sur les structures et les anomalies.

Avant tout, la gravimétrie peut donner une image de la répartition des densités du sous-sol, et par là même définir la structure si les variations de densité correspondent à des unités géologiques différentes. Il apparaît donc une dualité des objets détectables : les corps de densité anormale et les structures marquées par une anomalie dans la distribution des densités.

Classiquement, la gravimétrie a été utilisée sur une large échelle dans la prospection pétrolière, que ce soit par la détermination des variations des composantes du champ de pesanteur (balance d'Eötvös), ou de sa composante verticale (gravimètres modernes). Mais son utilisation dans la recherche minière est restée dans l'ensemble assez rare ; l'effort d'adaptation est récent et demeure dans une large mesure lié à l'évolution des problèmes modernes de prospection. Dans ce domaine se retrouve encore le double aspect des problèmes abordés : l'anomalie de densité et la structure.

Les anomalies de densité ont été les premiers objectifs des prospections gravimétriques minières et quelques succès ont été enregistrés dans le cas de recherches de minéraux denses tels que la chromite (Yungul, 1956 ; Ergin, 1952) ou des minerais de fer (Hinze, 1960). Mais, bien entendu, pour qu'un corps minéralisé soit détectable, il faut que son volume et son contraste de densité (en fait, une fonction du produit de ces deux paramètres) soient suffisants. A l'une des extrémités des possibilités se trouvent les anomalies de grand volume et de faible contraste, à l'autre certains amas très petits et denses, comme ceux de chromite qui ont pu être détectés, dans certains cas, malgré leurs petites dimensions : 25 x 50 m (Hammer *et al.*, 1945).

Un autre aspect des variations de densité, les variations latérales de faciès à fort gradient peuvent dans certains cas être directement détectées par gravimétrie. L'exemple est déjà plus délicat, plus subtil à étudier car les contrastes de densité sont alors toujours faibles mais partiellement compensés par le volume des corps anormaux. A cet égard, les exemples de recherches de récifs par microgravimétrie (Ferris, 1964 a) ou de lambeaux sédimentaires préservés par l'érosion (Ferris, 1964 b) sont significatifs. Les anomalies apparaissent malheureusement toujours, assez faibles, et la méthode n'est applicable que dans certains cas particuliers, notamment là où les corrections topographiques sont très réduites. L'exemple est cependant à retenir par son analogie avec certains problèmes de recherche minière.

Quels que soient les résultats obtenus dans ces cas particuliers, il ne faut pas considérer la détection directe d'une anomalie de densité comme une méthode générale : les applications demeurent rares et limitées (Goguel, 1963). Seul le cas des récifs, par son aspect intermédiaire entre la recherche d'anomalie de densité et celle de structure, paraît favorable à l'exploration de certains gîtes stratiformes périrécifaux.

L'étude des structures est plus classique au moins en ce qui concerne la prospection pétrolière. Dans la reconnaissance minière de gîtes stratiformes cette recherche s'est révélée être un élément positif et fructueux : le grand nombre de gisements liés géométriquement à certains types de structure en est la raison fondamentale. Mais le problème gravimétrique présente alors des aspects différents des problèmes classiques : la géométrie des formes et leur enfouissement.

Aucune loi ne se dégage de la taille et de la morphologie des structures favorables aux concentrations stratiformes, aucun modèle général ne peut être défini : ici, très amples, elles peuvent jouer un rôle nul ou très réduit, alors que là, à Largentière par exemple, bien que peu accentuées et réduites, elles induisent un gisement de belle importance.

De fait, il faut être prudent dans l'estimation de l'intensité d'une structure car ce terme recouvre deux phénomènes distincts :

- la structure primaire est le résultat de mouvements épirogéniques qui s'inscrivent dans la série sédimentaire par des anomalies de puissance et de faciès.

- la structure secondaire résulte de l'histoire géologique qui amplifie souvent considérablement l'"embryon tectonique" primaire.

De fait, il convient de distinguer trois cas :

- la structure primaire se trouve "fossilisée" et s'amortit très vite dans la série surincombante,
- la structure primaire est amplifiée par les mouvements ultérieurs de même tendance que les mouvements précurseurs,
- les tendances initiales s'inversent lors des jeux ultérieurs.

La recherche de chacun de ces cas peut être abordée par l'emploi de techniques gravimétriques, mais seul le premier, particulièrement délicat par toute autre méthode (1) est le terrain d'élection de ces techniques. Les structures non fossilisées peuvent aussi être efficacement recherchées par cette voie lorsque les autres méthodes s'avèrent peu efficaces, c'est-à-dire là où les conditions de surface ne permettent pas de levés fins ou bien lorsque les données lithostratigraphiques se trouvent mal adaptées au problème posé, ce qui est précisément le cas des structures de Largentière. Bien entendu, le résultat ne peut être que la diagnose d'une structure secondaire : rien ne permet d'affirmer alors sa surimposition à un caractère primaire favorable.

Un des rares exemples de paléostructure étudiée par gravimétrie à des fins de prospection minière est l'exemple de la structure de Melle (Aubert et Lougnon, 1963) où une anomalie significative apparaît au-dessus d'un vaste dôme de plusieurs kilomètres d'extension mais très aplati. La reconnaissance en est possible, mais la structure d'ensemble est simple et d'autres méthodes (en particulier les sondages électriques) peuvent reconnaître cette irrégularité du socle.

La profondeur pratique d'investigation et d'exploitation des gisements minéraux est, malgré quelques exceptions, bien moindre que celle de la prospection pétrolière. Le problème est donc quelque peu différent par l'échelle et les moyens à mettre en œuvre.

Non plus à l'échelle de l'anomalie, mais à celle de l'unité géologique, des investigations gravimétriques ont permis à A. Sh. Faytel'son (1965) d'établir une classification des structures tectoniques de plateforme et des paléostructures. Dans l'exploration complète d'une vaste zone, de telles considérations devraient favoriser une sélection efficace des domaines et guider les reconnaissances vers les sites les plus favorables.

Mais que l'on retienne l'aspect "densité" ou l'aspect "structure" la gravimétrie apparaît assez mal adaptée aux recherches minières. Toutefois l'introduction récente d'une technique particulière, la mesure directe de la dérivée seconde verticale de g , "permet de réduire au maximum l'importance des corrections et semble autoriser une gravimétrie au centième de milligal" (Pham Van Ngoc, 1964). Dans ces conditions beaucoup plus favorables, il est très possible que la gravimétrie s'avère très efficace dans certains problèmes particuliers.

(1) Bien que délicate, la recherche des répercussions sédimentologiques des structures enfouies peut être abordée mais il est rarement possible de conclure dès que l'enfouissement est important. L'exemple de l'étude d'une anomalie sédimentologique du Keuper terminal, de l'Infralias et de l'Hettangien est caractéristique de cette difficulté (Samama, 1966) : il n'a pas été possible de lever l'alternative entre la répercussion d'une structure enfouie et des conditions physiographiques locales indépendantes des antécédents géologiques.

Le problème tel qu'il apparaît dans le cas concret étudié ici est le suivant : une campagne de gravimétrie a été réalisée sur une vaste zone englobant le site de Largentière mais l'interprétation de cette campagne est rendue très délicate par la méconnaissance des effets des objets recherchés.

Avant toute chose, il convient donc de rechercher les effets des structures connues et d'étudier dans quelle mesure les structures ou les variations de densités dues aux changements de faciès et à la présence de minerais peuvent entrer en ligne de compte.

Le dépouillement complet de la campagne de gravimétrie sort du cadre volontairement limité de ce travail. L'étude géologique approfondie de toute la bordure sédimentaire s'accommoderait cependant fort bien de ces connaissances complémentaires alors que l'irritant problème de la détection des gisements aveugles en est toujours à la recherche d'une méthode efficace. Mais dans quelle mesure la gravimétrie est-elle efficace et permet-elle de résoudre les problèmes posés ?

B - PRINCIPE ET MÉTHODE

Une répartition homogène des densités dans le sous-sol proche se traduit en surface par une carte de la composante verticale de g à variations lentes et régulières dues à l'isostasie, à l'effet de latitude et aux masses lointaines. Mais l'introduction au sein de cette distribution des densités d'une anomalie de petite taille va produire une légère distorsion des courbes isanomales. Pour isoler le phénomène perturbateur, il suffit donc, en principe, de soustraire l'effet régional à l'effet local, donc de soustraire l'anomalie "régionale" à l'anomalie de Bouguer (1). L'anomalie résiduelle ainsi obtenue doit traduire les perturbations dues à une distribution particulière des densités à grande échelle.

Pratiquement, le premier problème est donc celui de la réalisation de la carte d'anomalie de Bouguer à partir des mesures brutes. L'anomalie de la gravité A peut se représenter par une formule du type :

$$A = g - (g_0 - C.Z - T)$$

où : g : est la valeur mesurée de la gravité,

g_0 : est la valeur normale de la gravité à la latitude de la mesure,

$C.Z$: est la correction de Bouguer qui ramène la valeur mesurée de g au niveau du géoïde de référence (correction d'air libre et correction de plateau),

T : est la correction topographique, c'est-à-dire l'effet qu'aurait le nivellement du sol à l'altitude de la station.

En fait, la mesure de g est toujours effectuée par comparaison à la gravité d'une station de base (base de référence) et la répartition des écarts de fermeture entre deux passages à la base permet d'éliminer les erreurs de dérive (dérive physique du gravimètre et variation diurne luni-solaire).

Le résultat ainsi obtenu (A), l'anomalie de Bouguer, représente "l'influence des différences qui existent entre la terre réelle et le modèle" (Naudy et Neumann, 1965).

Quels sont les ordres de grandeur des différentes corrections et de la précision escomptée de l'opération globale ? Il est impossible de répondre d'une façon générale pour les corrections topographiques et pour les corrections de Bouguer qui dépendent du relief et de la qualité du nivellement.

En l'occurrence, pour la campagne gravimétrique de Largentière (2), on peut admettre une erreur maximum de 0,2 mgl (Alajouanine et Jaeger, 1961) et seules les anomalies isolées de plus de 0,30 mgl ont une signification (3).

(1) C'est, en fait, un procédé empirique car c'est soustraire un phénomène "lissé" au phénomène brut. Or le résultat dépend bien évidemment de la réalisation du lissage, c'est-à-dire de l'obtention du fond régional. Un exemple étudié (figure 6) traduit bien cette difficulté.

(2) Campagne effectuée en 1961 par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières pour le compte de la Société Peñarroya.

(3) En fait, les corrections entre deux stations ne sont pas indépendantes (corrections topographiques en particulier) et on est en droit de s'attendre à une individualisation réelle d'anomalies d'un niveau bien inférieur à 0,30 mgl.

La limite de sensibilité de l'appareil (Gravimètre North American), soit 0,01 mgl, et la précision des mesures, soit 0,02 mgl, sont négligeables en regard des erreurs dues à la planimétrie et à l'altimétrie.

Le fond topographique utilisé est celui des stéréominutes de l'I.G.N. au 1/20 000^e avec calque des cotes. L'erreur moyenne de latitude est évaluée à 12 mètres (soit 0,6 mm au 1/20 000^e) et correspond à une erreur de 0,01 mgl sur g. L'erreur d'altimétrie est variable suivant les stations : repères du Nivellement Général de la France, points nivelés par le B.R.G.M. et points cotés de l'Institut Géographique National. C'est pour ce dernier groupe de stations que les erreurs sont maximum et atteignent 0,50 m, ce qui correspond à un écart de 0,10 mgl.

De fait, le problème des corrections nécessaires à l'établissement d'un document interprétable est rendu délicat par le choix de la densité servant à calculer les corrections. La densité moyenne, pratiquement évaluée par la méthode du profil de Nettleton, indique une valeur de 2,5 sauf sur l'Hettangien où la densité de 2,7 paraît mieux adaptée. Il faudrait donc établir des corrections différentes suivant le terrain affleurant.

Le but recherché ici n'est pas l'interprétation d'une campagne, mais l'évaluation de l'efficacité d'une méthode sur un problème bien défini. Le seul résultat qui présente donc un intérêt pratique est le niveau de l'erreur commise sur une mesure corrigée (0,2 mgl) et le seuil de caractérisation d'une anomalie résiduelle (0,3 mgl). Pour comparer ces données aux effets possibles des objets recherchés, il faut connaître ces derniers avec une bonne précision : les structures sont sans cesse mieux connues et la répartition des densités, grâce à d'assez nombreuses mesures, peut être précisée.

C - DENSITÉS

La connaissance précise des densités et de leur répartition dans l'espace est bien évidemment l'élément de base d'une étude des anomalies créées par une structure connue ou supposée. Pour connaître la répartition de ces densités, un moyen simple et évident serait de réaliser un échantillonnage de chaque domaine, mais les contingences de l'échantillonnage (sondage) et la multiplicité des mesures à exécuter rendent cette méthode impossible. Aussi, dans ce premier stade de la compréhension des anomalies, doit-on s'adresser à une démarche plus souple en utilisant les données déjà acquises.

L'objet recherché, la structure, se définit par une irrégularité de la disposition géométrique normale du socle et de sa couverture sédimentaire. La connaissance de la répartition des densités se simplifie si chaque terme pétrographique se définit par sa densité propre : il suffit alors de connaître la densité de chaque terrain et sa distribution spatiale. Dans la mesure où une unité lithologique présente une distribution régulière, un échantillonnage judicieux mais réduit permettra d'étendre la distribution observée à tout le domaine géologique.

La connaissance des densités a été précisée en deux étapes qui correspondent à deux phases d'interprétation. Lors de la campagne de prospection, le B.R.G.M. avait échantillonné et mesuré une centaine d'échantillons de surface et de carottes et obtenu des résultats pour chaque formation géologique (Alajouanine et Jaeger, 1961). Mais au début de ce travail, il est apparu nécessaire de préciser ces résultats et de reprendre le problème des densités sur une plus large échelle et uniquement sur échantillons de profondeur, ce qui était rendu possible par l'extension des campagnes de sondages et la mesure systématique des densités réalisée par la société Peñarroya sur ce matériel.

1 - MESURES

a) METHODE

Deux types de méthode permettent la connaissance de la répartition des densités : la méthode de mesure globale de la densité moyenne des roches *in situ* et celle de l'échantillonnage systématique et de la mesure directe. Pour des raisons de commodité, c'est cette dernière qui a été choisie.

Toutes les mesures de densité ont été effectuées au densimètre Goguel dont le principe est celui de la comparaison du poids d'un échantillon à son poids apparent dans l'eau.

Ce densimètre est des plus simples et peut très aisément être utilisé sur le terrain. Il est donc aisé de multiplier les mesures sur des échantillons prélevés depuis peu, et d'assurer ainsi une meilleure définition de la répartition des densités. De plus, même déréglé par un choc, cet appareil assure une très bonne comparaison des densités voisines à défaut d'une mesure absolue très précise : or ce sont précisément les écarts de densité qui interviennent dans une interprétation.

b) PRECISIONS ET CAUSES D'ERREUR

Un même échantillon a été mesuré 20 fois afin de s'assurer de la reproductibilité des mesures. La courbe de distribution des mesures (figure 2) met en évidence la très bonne reproductibilité des résultats : l'écart maximum observé 0,03 peut être très facilement réduit par la répétition de 2 ou 3 opérations. La moyenne obtenue est alors très proche (0,01) de la densité vraie.

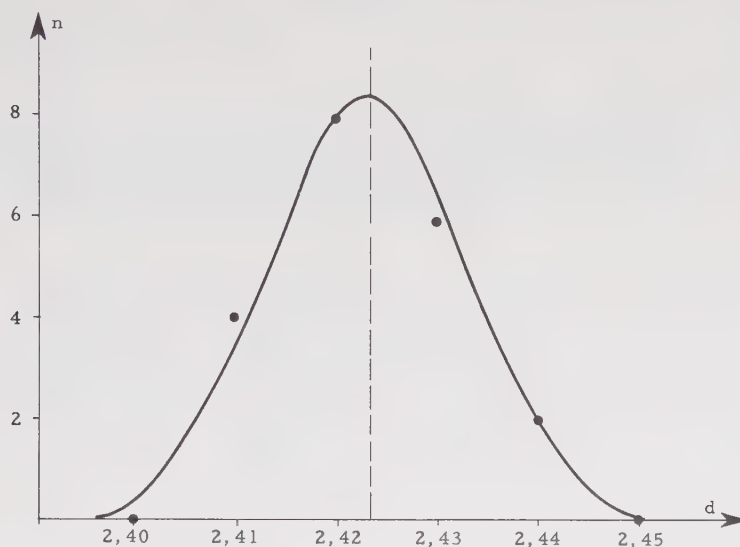


Figure 2 - Courbe de distribution du nombre (n) de mesures de densité (d) d'un même échantillon.

Les erreurs relatives réalisées sur ces mesures peuvent donc être considérées comme négligeables, leur effet essentiel étant d'élargir légèrement les courbes de distribution des populations de densité.

Les erreurs systématiques par dérèglement de l'appareil (1) sont négligeables si le dérèglement ne survient pas entre deux séries de mesures effectuées dans un même but. Mais, même dans ce cas, une légère erreur se produisant, non sur une population, mais sur les mesures d'un ou plusieurs sondages qui touchent divers terrains, donc diverses populations, il en résulterait une légère distorsion des courbes de distribution, c'est-à-dire un étalement supérieur des courbes spécifiques.

Mais la détermination de la densité se heurte à une difficulté plus théorique que pratique : les mesures correspondent-elles à la valeur qu'auraient les échantillons mesurés *in situ*, ou bien subissent-elles des modifications systématiques par effet de décompression et de déshydratation ?

La compressibilité des grès aux faibles pressions est fonction de la composition et de la texture des roches (Fatt, 1958) mais son influence sur la densité reste négligeable aux variations de pressions réalisées dans le cas étudié. Le phénomène peut devenir sensible pour les niveaux argileux, mais la faible extension de ces roches permet de négliger cet effet.

(1) En toute rigueur, il est possible d'éliminer cette source d'erreur par la vérification expérimentale de l'appareil et son ré-étalonnage peu compliqué.

Centre de classe	1	2	3	4	5	6	1 + 2	4 + 5
2 20			1		1			1
2 25			1		0			0
2 30			4		2			2
2 35			6	1	3			4
2 40	2		21	2	12		2	14
2 45	5	1	20	4	13		6	17
2 50	6	2	26	4	11	1	8	15
2 55	6	2	26	6	19	1	8	25
2 60	12	4	16	5	17	1	16	22
2 65	3	1	9	5	15	0	4	20
2 70	3	1	5	3	11	0	4	14
2 75	0	0	2	2	8	9	0	10
2 80	3	1		3	9	5	4	12
2 85				0	3	4		3
2 90				1	3	2		4
2 95					1	1		1
3 00					0	0		0
3 05					1	1		1
3 10					1			1

Tableau II - Répartition des densités par terrains.
1 : Granite - 2 : Permien - 3 : Buntsandstein - 4 : Muschelkalk - 5 : Keuper - 6 : Hettangien.

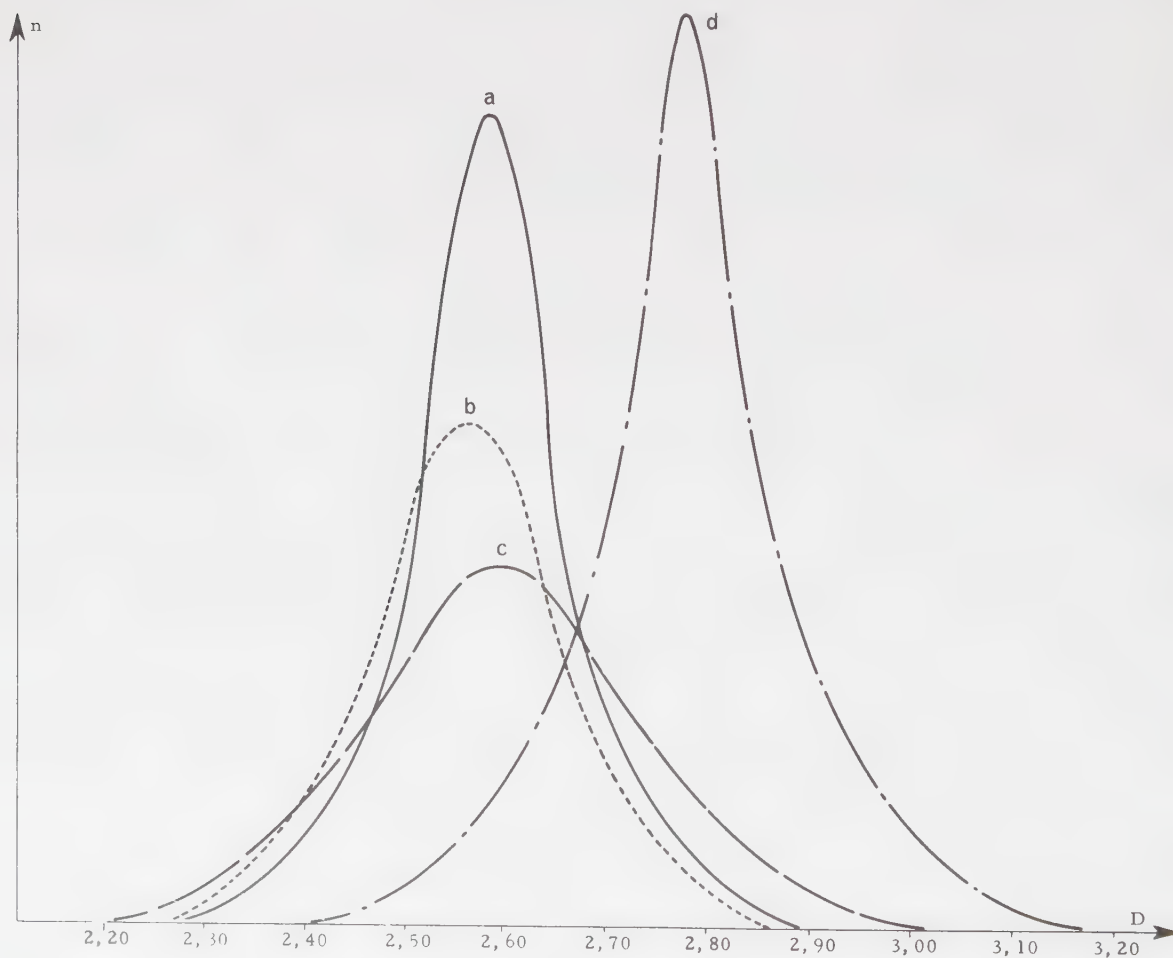


Figure 3 - Courbes de distribution du nombre (n) de mesures de densité (D) pour différents terrains.
a/ Granite et Permien - b/ Buntsandstein - c/ Muschelkalk et Keuper - d/ Hettangien.

La déshydratation est tout aussi négligeable car les échantillons ont toujours été prélevés peu après le carottage et la réhydratation partielle due à la mesure suffit amplement (1). Il aurait été possible de remédier à cette difficulté mineure par parafinage des échantillons dès leur prélèvement mais l'organisation même des sondages et des mesures se prêtait mal à cette opération.

La seule précaution qui semble impérative est de ne pas opérer sur échantillon d'affleurement car alors, outre les erreurs d'échantillonnage, les erreurs dues au lessivage ou aux recristallisations superficielles deviennent systématiques.

En bref, la précision des mesures paraît parfaitement adaptée à la caractérisation de chaque terrain et les erreurs peuvent être tenues pour négligeables devant les effets de l'échantillonnage.

2 - POPULATIONS DE DENSITE

a) ECHANTILLONNAGE

Comment échantillonner un sondage pour réaliser des mesures de densité destinées à une interprétation gravimétrique ?

Deux roches identiques ont bien entendu la même densité, et par extension, une unité géologique caractérisée par des roches d'un même type doit présenter une distribution de densité homogène. Il est donc possible de prélever des séries d'échantillons au sein de chaque unité lithostratigraphique et d'étudier leur répartition des densités.

Mais à l'intérieur d'une unité lithostratigraphique représentée dans un sondage, comment choisir les échantillons ?

Chaque point étant repéré par sa cote, le tirage au hasard des cotes réaliserait un échantillonnage totalement aléatoire répondant aux besoins. Cependant, en pratique, le phénomène lithologique n'étant pas périodique, un échantillonnage systématique à intervalle régulier permet d'alléger la méthode de prélèvement. La méthode est même rigoureuse à partir du moment où le principe d'équiprobabilité est respecté, c'est-à-dire dès que chaque échantillon a la même chance d'être prélevé (Gy, 1964). Et de fait, c'est là qu'apparaît la difficulté réelle : le carottage n'est jamais parfait et ce sont toujours les mêmes types pétrographiques qui sont les moins bien représentés (essentiellement les niveaux peu indurés). Parallèlement, les échantillons de ces niveaux sont les plus délicats à mesurer. Il y a donc un facteur d'erreur systématique d'échantillonnage et il est aussi difficile d'y remédier que d'évaluer ses effets.

Une autre difficulté apparaît avec le nombre total d'échantillons mesurés : les sondages cherchaient tous à reconnaître les grès du Buntsandstein qui se trouvent abondamment mesurés (137 valeurs) ; pour atteindre cet étage, la grande majorité des sondages a traversé l'ensemble Keuper-Muschelkalk dont les densités se trouvent encore mieux définies (166 valeurs). Mais, à l'opposé, il existe peu de valeurs pour l'Hettangien (25), le socle granitique (40) et le Permien (12).

Pourquoi avoir regroupé Muschelkalk-Keuper et granite-Permien ? Si les analogies pétrographiques partielles peuvent justifier la première assimilation, il n'en est rien pour la seconde, mais le simple examen des distributions de densité (Tableau II) montre l'identité des populations de densité entre granite et Permien, et entre Muschelkalk et Keuper : il est légitime d'opérer ces regroupements (2).

Plus explicites apparaissent les courbes de fréquence des densités (figure 3) qui montrent l'individualité de l'Hettangien (d) très dense et une forte ressemblance entre les densités des groupes granite-Permien (a), Buntsandstein (b) et Muschelkalk-Keuper (c) ; ce groupe paraît cependant un peu plus lourd que les autres.

L'interprétation gravimétrique s'accommode mal de modèles compliqués, il convient donc de rechercher les identités et distinctions entre ces ensembles élémentaires, mais pour cela il faut avant tout spécifier les distributions.

(1) La proposition a été vérifiée par mesure de l'échantillon avant une déshydratation complète puis après la réhydratation due à la mesure elle-même. Aucune différence n'a été notée.

(2) En toute rigueur, il est possible de démontrer cette proposition par la comparaison statistique des populations.

b) SPECIFICATION DES DISTRIBUTIONS

L'allure des courbes de fréquences (figure 3) laisse supposer que les lois de référence des distributions statistiques sont des lois normales, mais il convient de s'en assurer pour pouvoir, par la suite discriminer les populations.

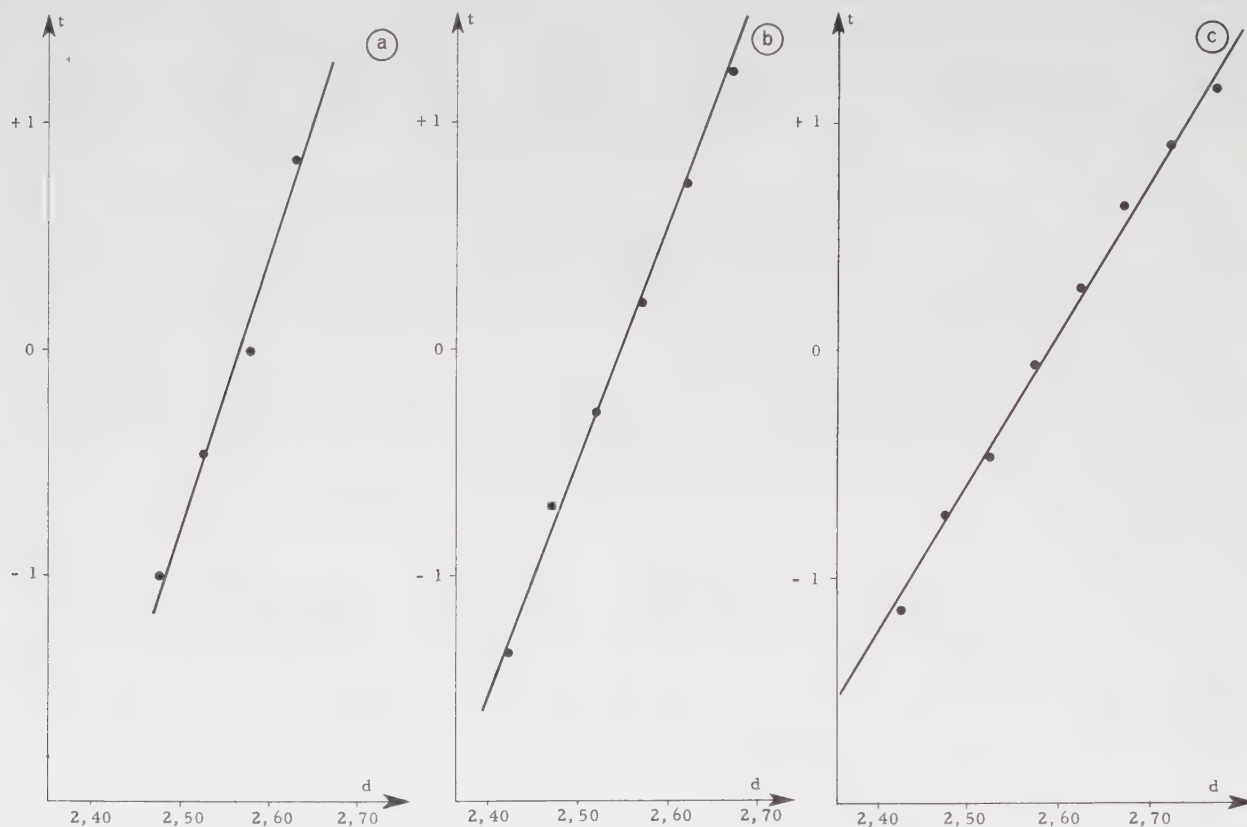


Figure 4 - Droites de Henry des distributions de densité.
a/ Granite, Permien et Buntsandstein - b/ Muschelkalk et Keuper - c/ Hettangien.
La spécification normale des distributions est très acceptable.

Qualitativement, d'abord l'établissement des droites de Henry (figure 4) semble confirmer que les diverses populations (excepté celle des densités de l'Hettangien trop mal représentée pour être testée) répondent à une spécification normale ; mais pour préciser cette indication les tests du χ^2 ont été effectués sur la population du Buntsandstein et du groupe Muschelkalk-Keuper : les résultats sont probants au seuil $s = 5\%$ pour l'une et l'autre population (Tableau III).

Population	χ^2	Nombre de degrés de liberté	χ^2_{α}
Buntsandstein	2,63	4	9,50
Muschelkalk-Keuper	3,70	6	10,65

Tableau III - Résultats du test du χ^2 des populations de densité.

La spécification normale de ces deux populations peut être retenue, et par identité des phénomènes de répartition de densité, il est légitime d'admettre cette même loi pour le groupe granite-Permien et pour l'Hettangien. Il est dès lors possible de traiter mathématiquement ces populations.

Le résultat du dépouillement des valeurs des densités est donné par le tableau IV.

	Granite + Permien (a)	Buntsandstein (b)	Muschelkalk + Keuper (c)	Hettangien (d)
Moyenne	2,576	2,553	2,599	2,784
Ecart-type	0,975	0,102	0,150	0,116

Tableau IV - Caractéristiques des distributions de densité des différentes unités.

La répartition de densité au sein des unités géologiques considérées répond donc à une spécification normale. Les caractéristiques des distributions individualisent nettement l'Hettangien, mais dans quelle mesure une distinction entre les 3 autres groupes est-elle justifiée ?

c) COMPARAISON DES DISTRIBUTIONS

La spécification normale des populations étant retenue, il devient aisé de comparer les populations entre elles. En fait, le problème se réduit à la comparaison des 3 premiers groupes (a), (b) et (c), l'Hettangien (d), par sa densité moyenne élevée étant certainement différent.

Les résultats des comparaisons se résument ainsi :

- a et b : les variances et moyennes peuvent être assimilées ;
- b et c : ni les variances, ni les moyennes ne peuvent être assimilées ;
- c et a : les variances sont distinctes alors que les moyennes sont assimilables.

Aucune distinction n'apparaît donc entre les échantillons des populations représentant le granite et le Permien (a) d'une part, le Buntsandstein (b) d'autre part. Par contre, l'échantillon du groupe Keuper et Muschelkalk (c) s'individualise nettement.

Rien ne s'oppose donc à ce que l'on distingue seulement trois terrains :

- 1 - le groupe granite - Permien - Buntsandstein de densité 2,560 (1) ;
- 2 - le groupe Muschelkalk - Keuper de densité 2,599 ;
- 3 - l'Hettangien de densité 2,784.

Mais la grandeur qui joue un rôle en gravimétrie est non la densité mais la différence de densité entre les unités (différence appelée parfois improprement "contraste") et il est possible de simplifier le problème en considérant que toutes les anomalies résultent des distributions spatiales : d'une densité de 0,039 liée au Muschelkalk et au Keuper ; d'une densité de 0,224 liée à l'Hettangien.

Telles sont les informations disponibles sur la répartition des densités aux alentours du site de Largentière, mais il est logique à ce stade d'avancement de chercher à définir l'influence possible de la densité de la roche-hôte.

d) EFFET DES METAUX LOURDS

On dispose d'assez peu de données concernant l'influence des métaux lourds sur la densité des minerais car le type d'échantillonnage destiné à l'évaluation des accumulations métal est fort éloigné de celui destiné aux mesures de densité. Il est légitime cependant, au vu des observations microscopiques des minerais de Largentière de supposer que les espèces minérales denses (galène, blende, barytine) prennent la place d'une matière de même densité que l'ensemble de la roche stérile.

En effet, l'observation indique que les sulfures ou sulfates viennent essentiellement cimenter la roche détritique à la place de silice ($d = 2,65$) ou d'argiles ($d = 2,4$ à $2,5$) sans perturber notablement la porosité de la roche, et on peut admettre en première approximation que le ciment absent aurait la même densité moyenne que la roche, soit 2,56.

Cette hypothèse étant admise, il est alors aisé de calculer la densité théorique d'un minerai en fonction de sa teneur (t) en métal, opération qui conduit aux formules suivantes :

(1) Les deux populations a et b étant non distinctes, elles peuvent être considérées comme deux échantillons d'un même phénomène. La moyenne de la population a + b est obtenue par l'addition des distributions.

$$\text{- galène : } d = \frac{1}{0,39 - 0,298 t}$$

$$\text{- blende : } d = \frac{1}{0,39 - 0,208 t}$$

$$\text{- barytine : } d = \frac{1}{0,39 - 0,285 t}$$

Dans le domaine des concentrations courantes (0 à 15 %) les hyperboles représentatives de ces fonctions sont très voisines de droites et semblent en bon accord avec les quelques points expérimentaux disponibles (figure 5). Comme prévu, les variations de densité sont importantes et ne sont peut-être pas négligeables.

Il serait possible de confirmer par des mesures en mine la validité des densités moyennes et de l'influence des métaux lourds. Les résultats de ces investigations directes sont en général assez

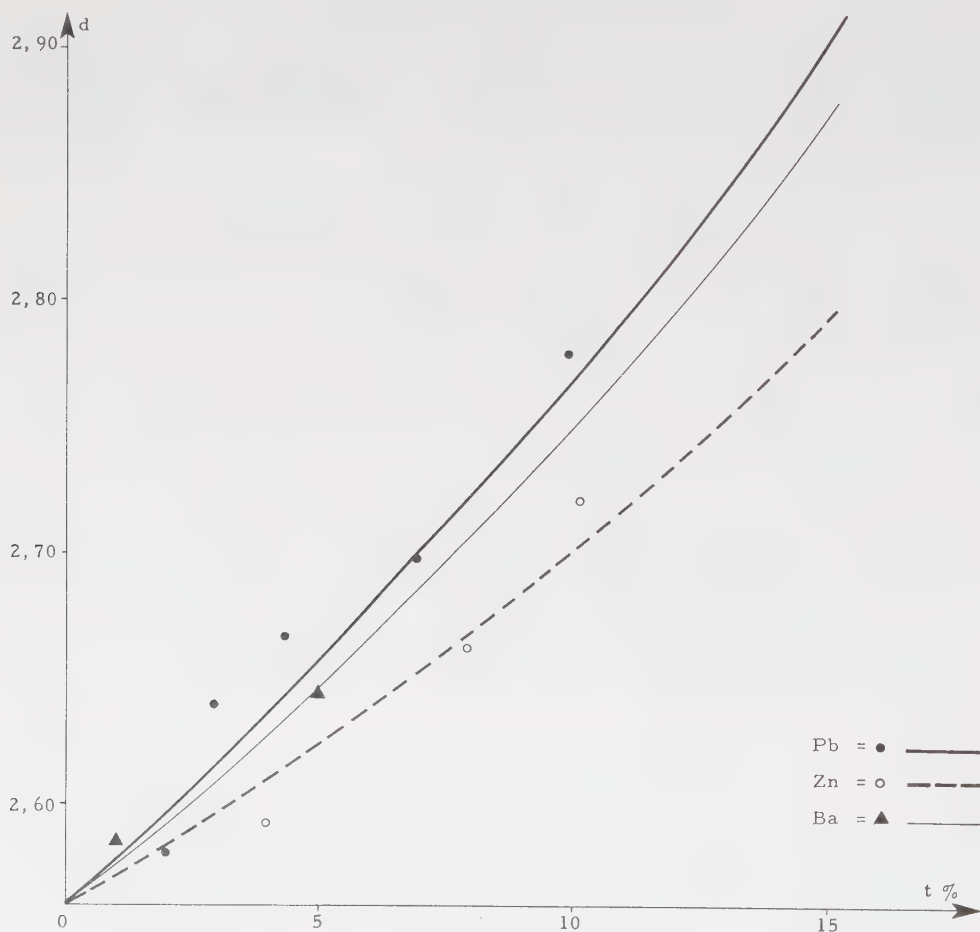


Figure 5 - Courbes de variation théorique de la densité (d) d'une roche avec sa teneur (t %) en métal. Les points expérimentaux correspondants ne viennent pas contredire les résultats théoriques.

satisfaisants (McCulloh, 1965), et cette méthode permet d'éliminer les difficultés d'échantillonnage et les effets parasites créés lors des mesures, mais la localisation des travaux miniers au contact ou à proximité des masses minérales donnerait des renseignements erronés sur la répartition des densités normales du Trias(1).

(1) Les résultats que l'on obtiendrait ainsi seraient sans intérêt pour la compréhension structurale de la région mais définiraient avec précision l'objet recherché : la structure minéralisée.

D - ÉTUDE DES STRUCTURES

1 - METHODES

Connaître une structure, c'est être en mesure d'indiquer la densité en chaque point d'un domaine donné. C'est est bien entendu rigoureusement impossible, mais les lois de distribution des densités étant connues, il est légitime de remplacer une distribution par sa moyenne et donc d'affecter à chaque terrain une densité fixe valable pour tous les échantillons.

En toute rigueur, cette attitude suppose que pour un terrain donné la répartition des densités est aléatoire et que les échantillons les plus lourds n'apparaissent pas dans un domaine particulier. Ceci est évidemment faux car, par exemple, le Buntsandstein minéralisé, donc plus lourd apparaît dans des sites privilégiés. En première approximation il est cependant possible de négliger ce facteur.

Pour chercher à atteindre les limites de la gravimétrie dans ce type de problème il a paru judicieux de comparer les résultats réels de la prospection à l'effet qu'auraient les structures connues tant par leur géométrie que par la répartition des densités.

Mais quelles sont les possibilités d'évaluation de l'effet d'une structure ?

La débauche de moyens et de variantes ne cache, bien évidemment, que la lourdeur et les difficultés présentées par chaque méthode. On peut distinguer cependant :

- les classiques abaques à maille qui permettent, sur structures cylindriques, de calculer assez lourdement mais avec une précision bien suffisante, les effets en un point de n'importe quelle masse perturbatrice.

- les formules donnant l'effet d'un corps géométrique simple (plan, sphère...). Plus que les précédentes, ces formules nécessitent des approximations car les corps sont quelque peu difficiles à assimiler à des corps de raison.

- la méthode proposée par B.J. Colette (1965) pour calculer l'anomalie créée par un cylindre horizontal limité par un polygone irrégulier à n côtés conviendrait assez bien aux structures étudiées dans le présent cas, mais la lourdeur de la méthode est hors de proportion avec les résultats escomptés.

- les méthodes de calcul d'anomalie par analogie optique (Aubert, 1964 et 1965 ; Kantas, 1965) présentent par contre le plus grand intérêt pour l'évaluation d'anomalies créées par un modèle.

La méthode automatise le calcul par abaque à maille de toute intégrale de surface. Le décompte des mailles est remplacé par la mesure d'un flux lumineux directement enregistré.

L'intérêt de cette méthode d'intégration réside dans la grande facilité de modification du modèle théorique lors de l'interprétation d'une anomalie.

Cependant le problème tel qu'il se pose est bien plus simple : malgré une certaine corrélation entre les résultats géologiques et gravimétriques des campagnes de Largentière (Alajaouine et Jaeger, 1961 ; Routhier, 1963) on peut douter de l'efficacité de la méthode. Il est alors normal de vérifier si les anomalies géologiques connues et favorables peuvent créer des variations locales de g comparables à celles obtenues par mesure.

Les structures connues présentent toujours une dimension bien supérieure aux deux autres. Il est donc légitime de simplifier le problème et de le réduire à un problème plan qui correspond à une structure cylindrique ; cela doit suffire à évaluer les ordres de grandeurs des anomalies théoriques, quitte à préciser ultérieurement, si cela s'avérerait nécessaire, l'effet de la troisième dimension.

2 - FAILLE MALET

Un des principaux accidents régionaux est une faille, ou plus exactement un faisceau de failles de direction Nord 30° Est (dite direction "Cévennes") qui effondre les compartiments Est. A Largentière, le plus important de ces accidents, appelé faille Malet, met en contact l'Hettangien et le Keuper (figure 6A).

La géométrie de cet accident permet, en première approximation, de considérer la structure comme cylindrique et d'évaluer la composante verticale de son effet avec une abaque à maille. Pour obtenir un résultat dont la signification soit aussi proche que possible de celle de l'anomalie résiduelle, il faut, bien évidemment, faire l'évaluation de l'influence des masses perturbatrices à un niveau aussi proche que possible du niveau topographique moyen de la zone d'investigation.

A partir de ces données, le modèle géologique simplifié (figure 6 B) conduit à une anomalie théorique représentée sur la figure 6 C.

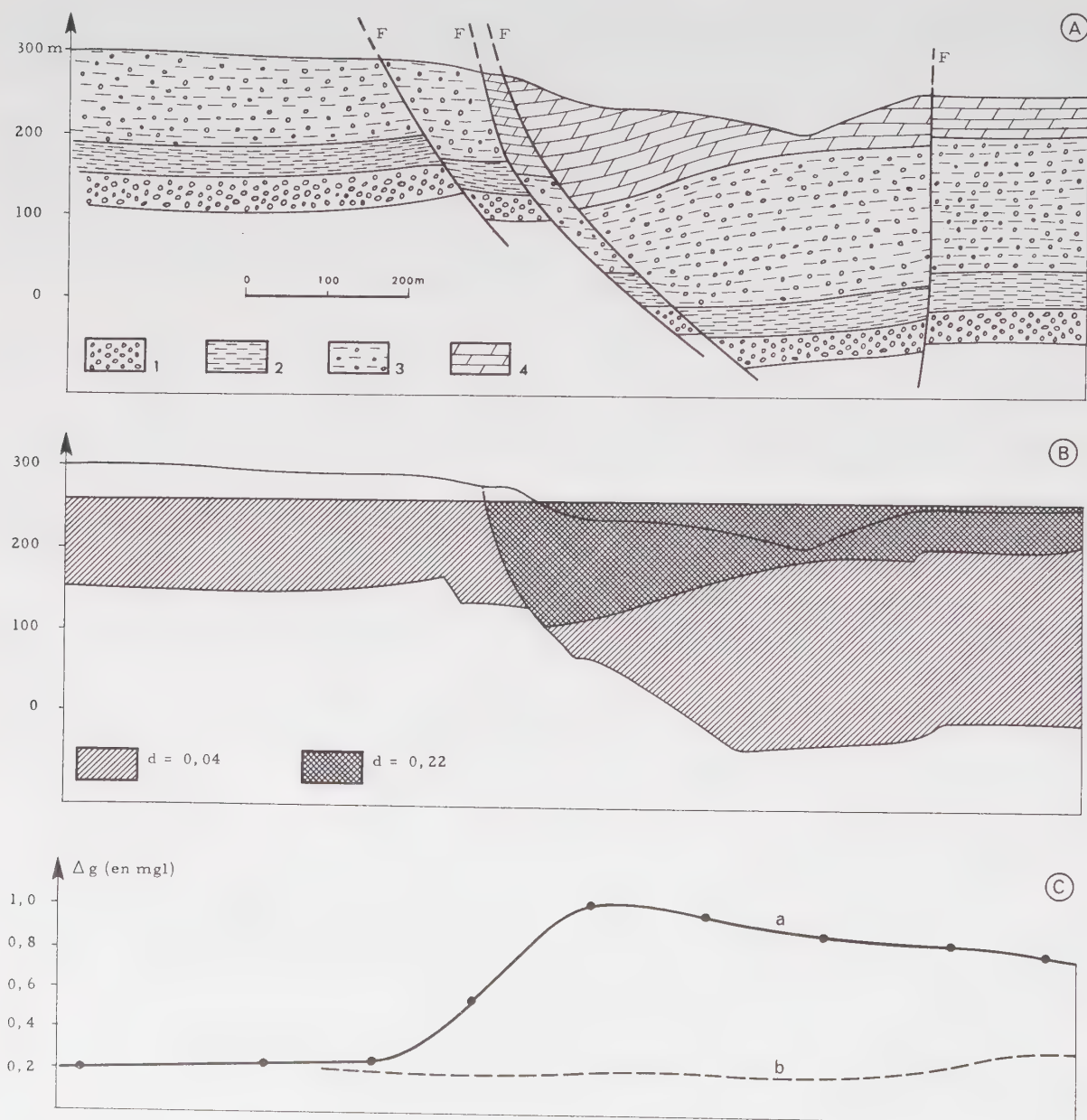


Figure 6 - Schéma de la structure de la faille Malet (A), du modèle géologique adopté (B) et des résultats de la gravimétrie (C).

1/ Buntsandstein - 2/ Muschelkalk - 3/ Keuper - 4/ Hettangien - a/ Anomalie calculée - b/ Anomalie mesurée.

Il a été établi que les anomalies paraissent significatives lorsque leur intensité dépasse 0,2 mg/l . Dans le cas présent, la variation de la composante verticale du champ créé par le modèle est de l'ordre de 0,8 mg/l et cette anomalie devrait se retrouver dans les résultats de la campagne effec-

tuée. A titre de comparaison, le profil déduit des cartes d'anomalies résiduelles est replacé sur la figure 6 C, mais aucun parallélisme n'apparaît entre les deux courbes(1).

L'explication de cet écart entre les résultats théoriques et pratiques est simple. L'anomalie résiduelle a été obtenue en soustrayant en chaque point le "fond régional" à l'anomalie de Bouguer. Or l'accident, dont les répercussions sont examinées ici, est un grand trait régional constant dont les effets sont assimilés à un fond ; il a donc été supprimé dans l'effet résiduel et n'apparaît plus dans les résultats pratiques.

Le mode de calcul de l'anomalie régionale n'est pas connu mais comme l'anomalie provoquée par cet accident apparaît sur la carte des anomalies de la gravité mais non sur la carte d'anomalies résiduelles, il faut bien admettre que c'est le passage de l'une à l'autre des cartes, c'est-à-dire le fait de retrancher le fond régional, qui efface les manifestations de la structure.

La confrontation entre les résultats pratiques et théoriques est donc là impossible. Mais que peut-on retenir de cet exemple ? Essentiellement qu'une telle structure géologique doit provoquer une anomalie un peu moindre que celle qui a été calculée (la troisième dimension ne serait plus infinie) mais encore très détectable. Toutefois, pour étudier une telle structure il serait malgré tout bien plus simple de se tourner vers la géologie, le contact Hettangien-Trias étant particulièrement net.

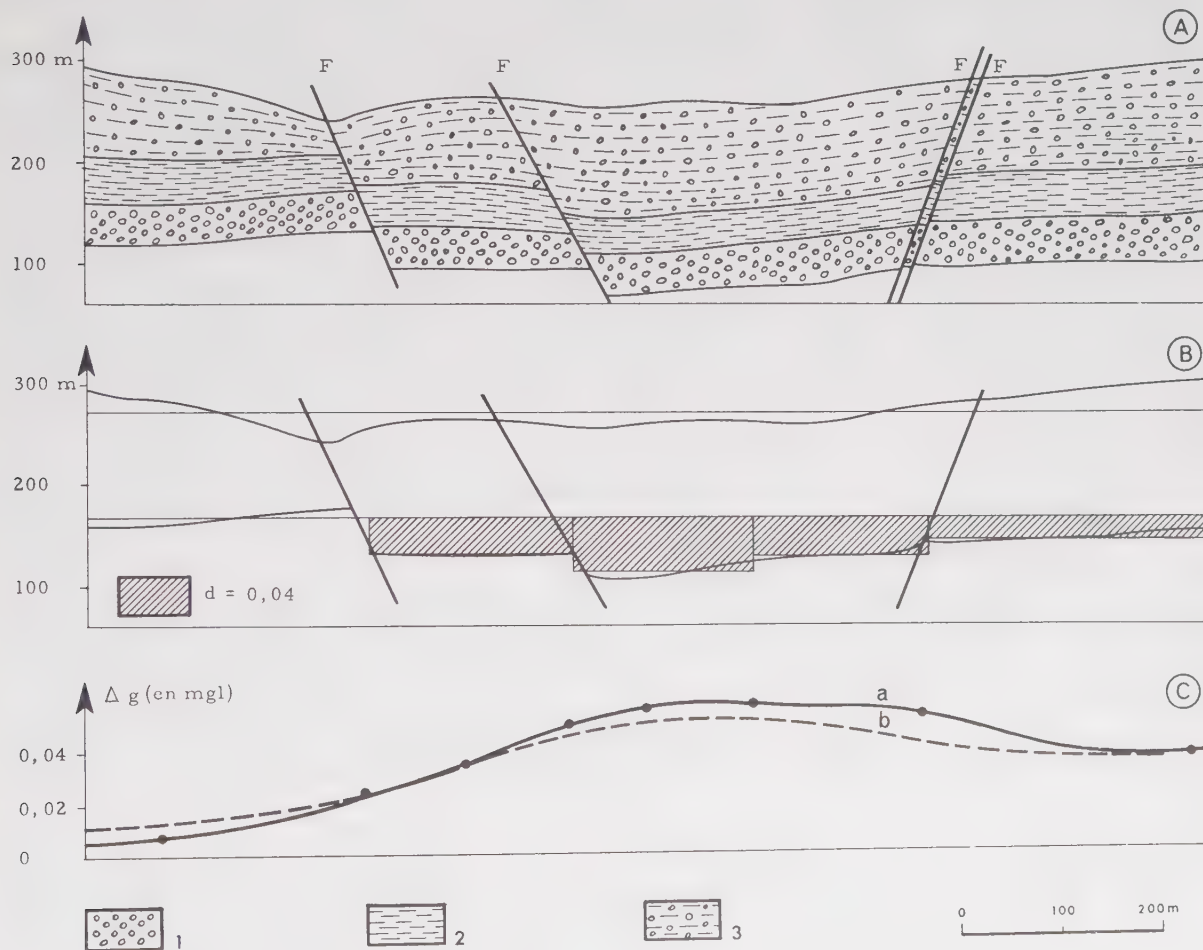


Figure 7 - Schéma de la structure "run" (A), du modèle géologique adopté (B) et des résultats de la gravimétrie (C).

1/ Buntsandstein - 2/ Muschelkalk - 3/ Keuper - 4/ Hettangien.

a/ Anomalie calculée - b/ Anomalie mesurée.

(1) On pourrait être tenté d'expliquer ces anomalies par une mauvaise évaluation de la densité dans les corrections topographiques et de plateau. Toutefois, les calculs ont été réalisés avec plusieurs densités et ce sont les résultats ayant le moins de parenté avec le modelé topographique qui sont choisis et servent ici. Il faut donc chercher ailleurs une cause à la divergence entre les résultats.

3 - STRUCTURE "RUN"

Ce deuxième exemple est *a priori* moins favorable puisqu'il ne met pas en jeu l'Hettangien, terrain le plus dense, mais il présente l'intérêt majeur de correspondre à la structure minéralisée essentielle de Largentièr.

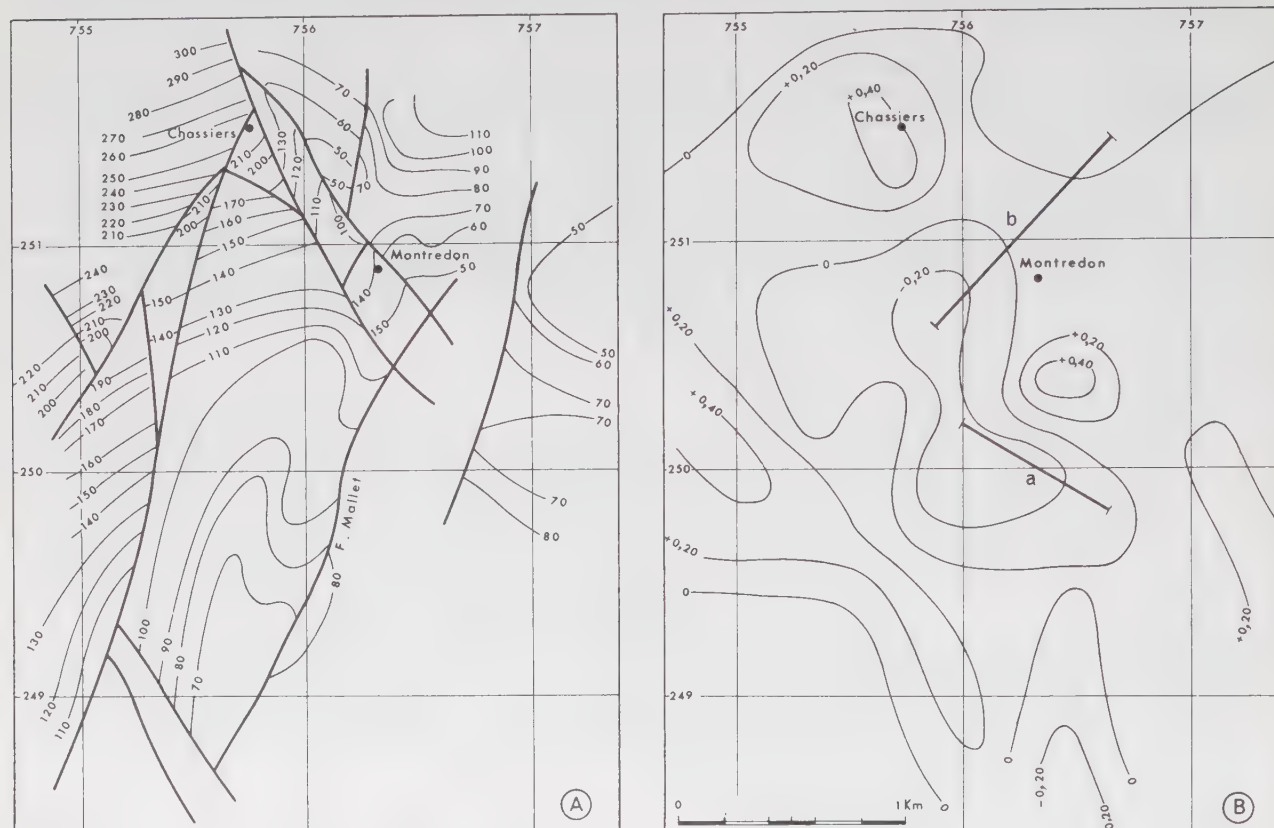


Figure 8 - Carte de la surface anté-triasique à Largentièr (A) et modelé gravimétrique correspondant (B) (d'après des documents de la Société Peñarroya, simplifiés).

Les profils (a) et (b) correspondent respectivement aux figures 6 et 7. Les altitudes du socle sont exprimées en mètres alors que les anomalies résiduelles le sont en milligals. La carte de la surface anté-triasique représente, avec un écart systématique constant, l'altitude de la base du Muschelkalk, premier niveau présentant un contraste de densité. On remarque fort peu de traits communs entre le modelé des deux cartes. Néanmoins, l'axe lourd passant par les puits de Chassiers et de Montredon pourrait correspondre à la bordure du "run" de même que la zone haute de Montredon pourrait se marquer par l'amoindrissement de l'anomalie à hauteur du profil (b). Mais en tout état de cause les anomalies créées par les structures sont loin d'atteindre le niveau de caractérisation, et on ne peut retenir aucune corrélation valable entre les deux phénomènes.

Deux remarques s'imposent dès maintenant : la densité moyenne adoptée pour le Buntsandstein est un peu faible à cause de l'accumulation du métal dans cette structure, mais par simplification ce facteur sera négligé de même que l'effet de la troisième dimension qui n'est pas infinie. Si la première cause d'erreur devait alourdir l'anomalie par rapport au calcul effectué, la deuxième devrait l'alléger. On ne peut cependant, sans aller à un stade d'interprétation plus poussé, tenir compte de ces facteurs.

Le schéma géologique, le modèle de densité et l'anomalie théorique sont représentés sur la figure n° 7. Le calcul a été effectué non plus par un abaque à maille, mais par abaque donnant l'effet d'un rectangle mince horizontal.

On constate que l'anomalie calculée est très faible : 0,04 mgl, soit bien moins que le seuil significatif (0,2 mgl), alors que l'anomalie résiduelle est très proche de l'anomalie calculée et peut être même confondue au vu de la précision du calcul et du tracé des isanomaes sur les cartes.

La concordance des résultats, bien que non significative, incite cependant à poursuivre la comparaison et à rechercher si l'ensemble de la structure de Largentière peut être retrouvée.

L'axe du "run" apparaît très discrètement par une zone dense, orientée entre les puits de Chassiers et Montredon, mais assez largement interrompue au Nord-Ouest de ce dernier (figure 8B). Cet ensembllement du relief gravimétrique peut qualitativement correspondre à la structure positive de Montredon et il existe bien une corrélation qualitative très lâche entre le relief de la surface anté-triasique et le relief gravimétrique (figures 8A et B).

Mais la faiblesse même de la corrélation est telle qu'il apparaît totalement impossible de prévoir de telles structures à partir de la carte gravimétrique et que les anomalies parasites l'emportent de beaucoup sur les anomalies possibles des structures recherchées. *Le seuil de caractérisation de 0,2 mgl apparaît bien trop élevé en regard des anomalies créées (1).*

A quoi doit-on alors attribuer le modelé gravimétrique obtenu qui souligne bien les directions géologiques essentielles ? A des défauts de correction ou à des structures profondes du socle ? Il est malaisé de répondre mais un point apparaît clairement : l'atténuation générale des anomalies dans la zone d'ennoiement du socle au-delà de 250 m de profondeur, c'est-à-dire là où le Lias apparaît. Il semble que ce soit là une preuve de l'influence de l'hétérogénéité du socle et que la majorité des anomalies soient attribuables à ce phénomène.

On pourrait, en première hypothèse, penser que cette atténuation serait due à la topographie du socle, si la densité de cette unité avait été mal évaluée. C'était là le but de la prospection mais l'exemple de la figure 8 montre, de façon parfaite, que cette hypothèse ne peut être retenue et qu'il est nécessaire de faire appel à une autre cause.

Un certain nombre d'autres anomalies ont été l'objet d'investigations de détail mais aucune n'a montré des aspects bien différents des exemples exposés.

A ce stade, les résultats paraissent bien peu encourageants, et comme il ressort des exemples étudiés, le faible contraste des terrains en est la cause essentielle. On peut toutefois examiner l'influence possible d'une minéralisation importante en plomb. Là aussi le calcul fait ressortir des résultats bien peu significatifs. Prenons comme modèle simplifié un panneau minéralisé de 50 m de côté, de puissance 10 m à 10 % de plomb, et situé à 50 m de profondeur (ce qui paraît être un modèle extrêmement optimiste et même improbable et supérieur à toute réalité). L'anomalie créée en surface au centre de cette structure est de l'ordre de 0,03 mgl donc bien inférieure au seuil de caractérisation : 0,2 mgl. L'influence de la minéralisation est donc négligeable.

Le cas des ciments barytiques très développés en certaines zones est peu différent : les teneurs peuvent être plus élevées, la puissance des couches supérieures et leur extension presque infinie. Malheureusement, aucune donnée précise sur les teneurs et leur répartition n'existe et il est impossible de fixer l'ordre de grandeur de l'influence mais il semble difficile d'attribuer des anomalies de plus de 0,2 mgl à des ciments barytiques (2).

Un aspect positif ressort cependant de ces considérations : si les structures recherchées échappent à la méthode, c'est essentiellement à cause du faible contraste de densité existant. Pourquoi ne pas limiter l'application de la gravimétrie aux structures où le Lias, très dense, dessine les structures enfouies ?

Ceci n'est pas en contradiction avec l'atténuation des anomalies résiduelles dans les zones d'ennoiement du socle, car la structure locale de l'unité liasique est très calme, aucune faille de rejet notable ne vient l'affecter.

A titre d'exemple, l'influence d'une faille difficile à détecter par géologie de terrain (3) a été calculée pour plusieurs rejets (figure 9). Les résultats sont probants : les anomalies engendrées par de telles structures sont très décelables dès que le rejet dépasse 20 m. Un résultat en découle : si la structure "run" était plus profonde et se traduisait en surface par des variations des épaisseurs de roches denses liasiques, elle serait alors détectable. C'est d'ailleurs ce qui semble ressortir des cartes d'anomalies résiduelles : le prolongement sous le Lias de la structure ressort mieux que sa partie amont où n'affleure que le Trias (figure 8) et est d'autant plus net que le compartiment liasique est plus calme.

(1) Même en tenant compte de la remarque de la note infrapaginale, page 25.

(2) Cette anomalie de 0,2 mgl correspond à l'effet d'une couche infinie de 10 m de puissance à 20 % de baryum.

(3) La série homogène du Lias inférieur convient mal au lever d'accidents dont le rejet atteint quelques dizaines de mètres.

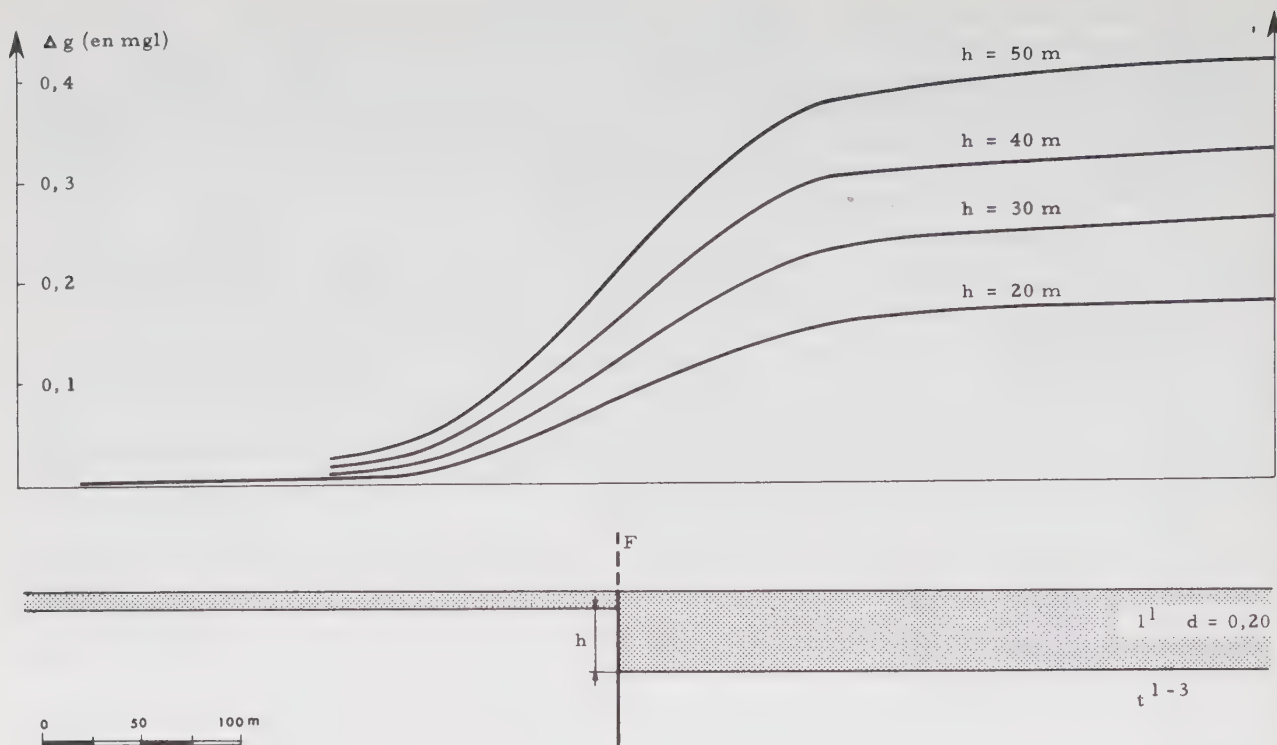


Figure 9 - Profils théoriques d'anomalies créées par une faille de rejet (h) affectant l'Hettangien de densité apparente $d = 0,20$. Une structure horizontale faillée peut être considérée comme un parallélépipède de densité $d = 0,20$ dont deux dimensions sont infinies et la troisième égale au rejet (h). Les anomalies sont détectables dès que les rejets atteignent 30 mètres.

Il est inutile de chercher à aller plus loin dans les interprétations car, dans l'ensemble, les anomalies recherchées sont inférieures ou au plus, égales aux phénomènes perturbateurs et il est déjà bien trop délicat de rechercher les structures connues au travers des cartes isanomales pour vouloir tenter une interprétation correcte des phénomènes en zone inconnue.

E - CONCLUSION

Que ressort-il de l'étude des densités et de la confrontation entre les anomalies résiduelles mesurées et calculées ? Le dépouillement des mesures de densité disponibles a montré le degré d'homogénéisation entre les différentes roches du socle et de la couverture permo-triasique, seul l'Hettangien apparaît bien marqué.

Résultat de ce peu de contraste général, les structures n'affectant que le Trias ne provoquent que des anomalies bien inférieures au seuil de caractérisation et la méthode n'est absolument pas applicable aux structures où n'apparaît pas l'Hettangien.

A quoi alors attribuer les anomalies résiduelles mises en évidence ? A de mauvaises corrections ? Il ne le semble pas car la direction de certaines d'entre elles correspond bien à des directions tectoniques régionales (1). Doit-on alors incriminer une hétérogénéité du socle non soup-

(1) Excepté toutefois s'il y a une corrélation entre la mauvaise correction et la tectonique par exemple, comme une influence de la tectonique sur la compression donc sur la densité -peu vraisemblable ici- ou bien comme des variations de faciès donc de densité de part et d'autre des accidents, cause possible mais qui n'a pas été mise en évidence ni par les études géologiques ni par les mesures de densité.

çonnée ? C'est très vraisemblable car comme il a été remarqué, avec un approfondissement croissant du socle, les anomalies tendent à s'estomper ; et la concordance entre la direction des structures gravimétriques et la tectonique régionale ne s'oppose en rien à ce point de vue.

La méthode n'est donc pas à rejeter systématiquement et la condition du succès dépend essentiellement de la géologie locale (structures, densités) et des conditions géographiques locales qui déterminent les corrections les moins précises (relief et nivellement).

Deuxième Partie

GÉOCHIMIE

A - PROBLÈME ET MÉTHODE

Peut-on faire appel à la géochimie pour tenter de mettre en évidence un gisement stratiforme aveugle et élargir ainsi l'éventail des moyens d'investigation ? Le défi peut-il être en partie relevé ? et le retard pris par les moyens de recherche sur les impératifs de l'exploitation et de l'économie minière peut-il être partiellement comblé ?

Ainsi se pose le problème ! Résolu dans certains de ses aspects (couverture faible des gisements par développement des sols), il demeure entier et d'une extrême complexité dès que l'on prétend détecter des gisements sous quelques dizaines, voir quelques centaines de mètres de couverture. Et, dans ce cas particulier, il en est de même que pour la majorité des méthodes : demi-échecs, demi-succès, exemples peu significatifs se succèdent sans que l'on puisse pour autant déjà dégager les lois et les conditions d'emplois de cette technique.

Le présent travail ne prétend pas résoudre ces difficultés : monographie analytique d'un exemple concret, il vise à définir les modalités d'emploi et les principes d'investigation préliminaire d'une technique.

Par de méticuleux travaux de terrains combinés à l'analyse statistique des résultats d'une campagne, ce but sera atteint ainsi qu'il paraîtra dans ces développements. Là où certains voyaient un phénomène simple par sa théorie et ses applications, il faut désormais établir la différence fondamentale mais souvent subtile à saisir entre les deux phénomènes essentiels qui contribuent à modeler le relief géochimique de la surface. Les erreurs d'interprétation commises dans le passé soulignent largement la portée de cette conception qui contribuera ainsi à l'œuvre entreprise sur les méthodes de prospection des gîtes stratiformes.

1 - DONNEES GEOLOGIQUES

Le premier écueil qui apparaît dans le dépouillement des travaux antérieurs et leur synthèse est l'insuffisance, voire l'absence des données géologiques. Il serait, en effet, vain de vouloir étudier les répercussions géochimiques de la présence d'un gisement sans préciser auparavant une certaine figuration de l'histoire géologique de ce gisement : chronologie relative des différentes époques de la vie d'un gisement, mais aussi chronologie absolue, car il est bien évident que l'évolution chimique d'un gisement et en particulier les migrations supergènes sont fonction du laps de temps pendant lequel le gisement sera demeuré dans des conditions particulières, par exemple à proximité de la surface topographique ; parallèlement, les conditions climatiques, hydrologiques et pédologiques durant toute cette phase peuvent être déterminantes dans le succès ou l'échec d'une prospection. Retracer un schéma géologique d'un gisement, c'est en connaître les différents aspects de son histoire, et premièrement son origine, point toujours le plus controversé. Cependant, le cas du gisement de Largentière ne sera pas discuté ici (1) car les hypothèses exprimées à ce sujet mettent toutes en évidence le rôle des processus sédimentaires :

- L. de Launay (1913) voyait volontiers de tels gisements résulter de la désagrégation mécanique des filons hercyniens et pensait même à une mise en place partielle des espèces minérales sous forme détritique.

(1) L'étude géochimique et métallogénique régionale est en cours; l'étude de l'origine de la minéralisation et des modalités de sa mise en place sera développée ultérieurement.

- A. Bernard (1962) puis P. Routhier (1963) attribuent un rôle important au remaniement dans la base des transgressions de préconcentrations de type pédologique et suivent en cela P. Lapadu-Hargues (1961) (1) et E. Fulda (1929).

- F. Fogliérini et A. Bernard (1961) soulignent l'analogie de ce gisement avec les gisements stratiformes typiques dont l'origine n'est plus discutée.

Il y a donc concordance d'ensemble des vues sur l'époque de mise en place du métal avec quelques nuances sur la phase de préconcentration. Pour le présent travail, ces variantes ne présentent qu'assez peu d'intérêt. Schématiquement, l'ensemble des phénomènes de concentration (au sens large du terme) qui interviennent dans une campagne de prospection géochimique se résument en trois phases principales :

- la phase de concentration (syn ou diagénétique précoce suivant les hypothèses),
- la phase de redistribution (essentiellement épigénétique),
- la phase de dispersion (essentiellement superficielle).

En fait, une distinction logique de ces stades devrait inclure la phase de dispersion au sein de la précédente dont elle n'est qu'un aspect particulier. Mais la prospection s'accommode mieux de cette classification.

Sans développer pour autant l'argumentation géologique sur la signification et la distinction des trois phases, il convient toutefois de préciser le sens qui leur est attribué.

a) PHASE DE CONCENTRATION

C'est la création de l'anomalie géochimique que constitue un gisement. Elle est définie par le facteur de concentration (2), ici de l'ordre de 500, du minerai moyen par rapport aux roches normales de même type et de la même province.

Les causes de différenciation ne seront pas abordées ici : c'est le domaine de la métallogénie. Elles sont cependant importantes par leurs implications directes dans la distribution géographique des teneurs autour des gisements et au sein des couches porteuses : c'est ce qui permet de définir morphologiquement et quantitativement les "modèles" géochimiques, les objets, que l'on doit rechercher.

Ce point est très important car la taille du gisement et sa teneur ne définissent pas le problème ; la taille des auréoles (aux différentes teneurs), et la définition des anomalies du fond régional (phénomène parasite gênant) sont, du fait même du type de prospection envisagé, les aspects primordiaux du problème.

La phase de concentration sera donc considérée comme statique, figée et caractérisée par ses causes et ses conséquences : les lois de distribution des teneurs dans le volume à prospecter.

b) PHASE DE REDISTRIBUTION

L'histoire géologique d'un gisement ne fait que commencer après sa mise en place. Sous l'effet de facteurs physico-chimiques, une nouvelle loi de distribution va tendre à s'établir vers la recherche d'un équilibre. Cette phase est profondément imbriquée dans ses aspects actuels avec la précédente, et en général il est impossible de préciser son rayon d'action et l'intensité de la redistribution. Un seul aspect peut néanmoins être évalué : la reconcentration épigénétique dans les failles, phénomène admis par L. de Launay (1913), réaffirmé et partiellement démontré par F. Fogliérini *et al.* (1965) qui le nomment "nourrissage" des failles.

(1) Conférence inédite, Ecole Nationale Supérieure de Géologie, Nancy.

(2) Cette notion est floue car le facteur de concentration dépend :

- de la teneur de définition du gisement : teneur qui n'est pas exempte de considérations économiques (cours des métaux, type d'exploitation, situation géographique...)
- de l'élément de comparaison : est-ce la lithosphère ? 20 ppm (Clarke, 1924) ; l'ensemble des arénites siliceuses ? 7 à 8 ppm (Pettijohn, 1963) ; ou le Buntsandstein ? 31 ppm (Pettijohn, 1963) ; ou encore le Buntsandstein ardéchois ? 80 à 100 ppm.

Les différents facteurs de concentration ainsi définis correspondent à des aspects particuliers de la différenciation chimique. Dans le cas présent, c'est le contraste d'un gisement exploitable par rapport au Buntsandstein régional et à ses anomalies qui présente une signification et une utilité.

Une reconcentration importante dans les failles ne peut aller sans une certaine migration le long de ces plans conducteurs, et, conséquence directe, une montée des métaux jusqu'au niveau d'érosion actuel doit être détectable. La détection de ces traces permettrait alors d'atteindre la localisation des amas minéralisés : c'est le principe des "anomalies de fuite" des gisements stratiformes.

Les causes même et les modalités de migration des cations à travers les failles relèvent encore du domaine de la métallogénie et ne sont pas examinées dans ce travail. L'hypothèse est admise comme base d'investigation, mais en réservant le droit de préciser le phénomène lors des conclusions de l'étude entreprise.

c) PHASE DE DISPERSION

Le phénomène essentiel recherché est peut-être la migration des métaux lourds à travers les failles, mais aucune étude directe n'en est possible : à proximité de la surface topographique, les conditions changent brutalement, les phénomènes pédologiques interviennent, la végétation crée des circulations d'eau et de sels minéraux alors que sur les pentes, les entraînements mécaniques déplacent et diluent les concentrations initiales. Bref, l'état de surface auquel le prospecteur a accès est *une image très floue et déformée du phénomène géochimique de migration dans les failles* ; un des aspects primordiaux de cette étude consistera à redresser puis préciser cette image pour la rendre interprétable.

Avant d'aller plus avant, il convient d'explicitier et de préciser la terminologie géochimique employée qui sera celle préconisée par C. Granier (1962) :

- fond géochimique local : teneur de fond d'une zone limitée, qui peut dans certaines conditions, être déjà anormale.

- anomalie : ce terme, utilisé pour "anomalie de teneur" se dit du résultat de la modification de la teneur de fond.

- teneur significative : teneur de la partie marginale d'une anomalie ; nécessite une coupure qu'il faut justifier.

- anomalie résiduelle : anomalie dérivant de l'évolution d'une roche minéralisée au cours de la pédogenèse.

- anomalie de fuite : c'est le résultat de circulation dans les accidents tectoniques.

- prospection stratégique : prospection conduisant à la reconnaissance générale systématique d'une vaste région.

- prospection tactique : prospection s'appliquant à une occurrence déterminée dans le but de résoudre des problèmes de détail.

A la lumière de ces considérations générales, la mise en évidence d'anomalies de fuite sera tentée, d'une façon peut-être indirecte mais rigoureuse. Les campagnes effectuées par la Société Minière et Métallurgique de Peñarroya servent de cadre et de support à cet effort : leur interprétation approfondie est le thème général de ce travail.

Ce n'est pas là, et cela ne pourrait être en aucun cas, une solution définitive de ce problème encore neuf. Mais à travers cette monographie, plus que l'exemple étudié, il faut peut-être voir l'esprit dans lequel le problème a été abordé et dans une moindre mesure, la méthode employée. C'est à cette condition et en multipliant de tels travaux que le problème des prospections géochimiques des gîtes enfouis progressera et sera un jour résolu.

2 - TRAVAUX ANTERIEURS

La littérature est très pauvre en exemples présentant des analogies avec le problème considéré ; le manque de diffusion des travaux ne dépassant pas le niveau de rapport technique en est la raison essentielle.

Il semble toutefois que les prospecteurs aient parcouru plusieurs étapes, soit en allant du problème le plus simple au plus complexe :

- recherche des gisements sous recouvrement superficiel épais (dépôts quaternaires, moraines, dunes fixées...),

- recherche des gisements liés aux strates sous recouvrement sédimentaire ancien par mise en évidence des traces de venues minéralisantes ayant circulé le long des failles,

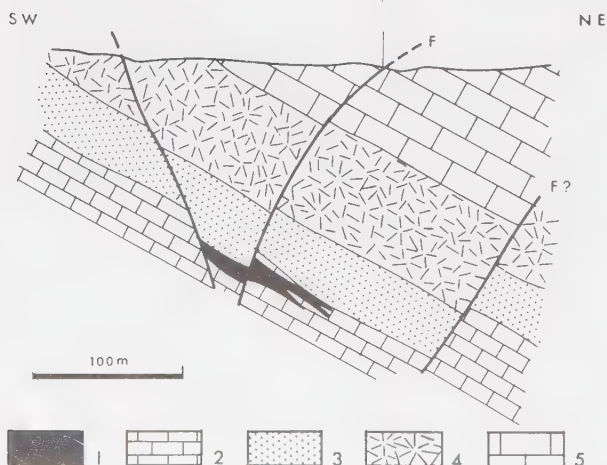
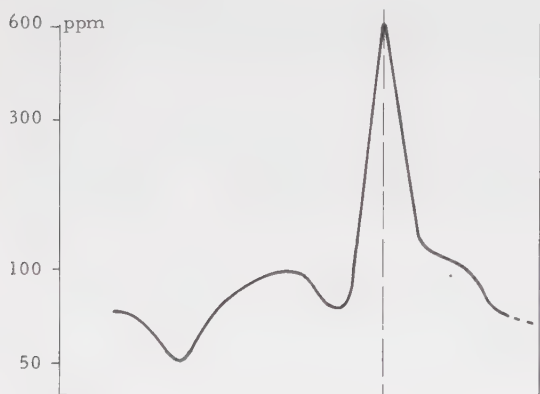
- recherche des mêmes gisements par mise en évidence des migrations épigénétiques à partir du dépôt initial.

Même dans le cas des recouvrements superficiels épais, les résultats ne sont pas toujours excellents :

- I. V. Sharkov et O. A. Gliko (1956) (*in* Ginzburg, 1957), citent un exemple d'échec de détection d'amas zincifère sous 0,50 m d'alluvions récentes. Mais A. Dreimanis (1960) met en évidence de très fortes anomalies sous plusieurs dizaines de mètres de moraine là où la morphologie permet des circulations d'eau importantes à travers le recouvrement. Exemple comparable, des migrations de cuivre et nickel à travers 20 à 50 m de dunes fixées ont pu être mises en évidence (Samama, 1963).

A la deuxième phase de l'évolution des principes, se rattachent quatre exemples quelque peu délicats à interpréter :

- I. I. Ginzburg (1957), cite un exemple de J. S. Webb qui décrit une anomalie géobotanique de contraste 1,6 au-dessus d'un amas aveugle de zinc profond de 100 m, mais pour I. I. Ginzburg, l'anomalie proviendrait d'une minéralisation disséminée bien au-dessus de l'amas. L'exemple est donc bien douteux, mais il faut déjà retenir l'idée de niveaux anormaux au-dessus d'un gisement.



- Expérience comparable, R. B. Fulton (1950) met en évidence des anomalies atteignant 1500 ppm à l'aplomb d'amas zincifères enfouis de 60 à 145 m, mais ne peut lever l'alternative entre l'hypothèse d'une migration supergène du zinc à la faveur des failles et l'hypothèse de récurrences minéralisées au-dessus des amas.

- J. R. Cooper et L. C. Huff (1951), décrivent un exemple d'un grand intérêt à Johnson Camp (Arizona), (figure 10) : une minéralisation cuivre-zinc essentiellement concordante avec la stratification se décèle en surface par une anomalie irrégulière mais forte le long du tracé des failles qui affectent l'amas.

Figure 10 - Schéma de la relation possible entre une anomalie géochimique et la trace d'une faille affectant un amas minéralisé à Johnson Camp (d'après Cooper et Huff, 1951).

1/ Amas minéralisé - 2/ Unité moyenne de la formation d'Abrigo (Cambrien moyen) - 3/ Unité supérieure de la même formation (Cambrien supérieur) - 4/ Formation de Martin (Dévonien) - 5/ Calcaire d'Escabrosa (Carbonifère inférieur).

Le profil géochimique est assez approximatif (maille trop lâche) mais semble mettre en relation l'amas minéralisé et l'anomalie détectée par l'intermédiaire d'une faille.

Pour ces auteurs, la venue métallifère conduite par la faille a remplacé préférentiellement une unité lithologique et a pu ainsi parvenir jusqu'au niveau d'érosion actuel.

Il semble néanmoins, d'après les descriptions données, que ce gisement puisse être un stratiforme faillé et métamorphisé : les circulations normales d'une faille auraient alors permis une migration des cations lourds jusqu'à plus de 130 m de l'amas.

Autre exemple, enfin : pour C. Granier (1958), il a été possible de mettre en évidence un gisement stratiforme sous 37 m de couverture sédimentaire (15 m de Toarcien et 22 m d'Eocène) mais le contraste géochimique est alors très faible.

Jusqu'ici, excepté dans le cas des recouvrements superficiels, l'origine profonde de la minéralisation était implicitement admise ; les failles détectées étaient considérées comme d'anciennes voies de migration des solutions minéralisantes, le phénomène restait d'application limitée. Il semble que ce soit en premier à C. Granier (1960), M. Aubague, F. Fogliérini et C. Granier (1964) que revienne le mérite d'avoir posé clairement le problème de la détection géochimique d'un gîte stratiforme enfoui et aveugle en considérant que les failles pouvaient, en certains points, avoir servi de voies de migration à des cations lourds. Pour ces auteurs, les exemples, tirés de la région même qui sert de support à cette étude, sont caractéristiques et il semblerait que la méthode puisse être un moyen d'investigation profonde (100 à 450 m)(1).

Certaines difficultés d'interprétation ont cependant conduit à remettre en cause les explications proposées et à approfondir l'étude des phénomènes géochimiques locaux. C'est ce travail dont les résultats sont ici présentés.

3 - LOCALISATION DU PROBLEME - BUT RECHERCHE

De 1961 à 1965, la Société Peñarroya a réalisé un certain nombre de campagnes de prospection tactique par prélèvement de sols à maille régulière (50 m) et d'alluvions le long des thalwegs. Les résultats de ces dernières campagnes sont par suite des entraînements mécaniques, encore moins ponctuels que les premiers et, conséquence directe, les problèmes d'interprétation s'avèrent encore plus délicats.

Seul le premier cas sera envisagé ici et plus spécialement les résultats des périmètres des Estourels et du Mas Gauthier (figure 1). Ils présentent, en effet, certains caractères très favorables à une compréhension des phénomènes, et essentiellement une uniformité géologique de surface ainsi qu'une bonne connaissance du sous-sol due aux campagnes de sondages.

Peut-on, à partir des cartes des résultats, dissocier les phénomènes qui concourent à créer la distribution de surface ? Comment doit-on interpréter les anomalies ? Quels résultats pratiques peut-on en tirer ? Voilà, en bref, les problèmes qui se posent et la démarche qui sera suivie ici.

B - DONNÉES CONCRÈTES DU PROBLÈME

Cas de la campagne des Estourels

Tout travail de géochimie n'est utilisable dans sa méthode et ses résultats que si les conditions générales sont bien établies. De même les interprétations tentées par la suite nécessitent une définition approfondie des différents facteurs ayant une influence sur les distributions géochimiques de surface.

1 - FORMES DU RELIEF, VEGETATION ET SOLS

Le périmètre des Estourels, objet des investigations principales se présente essentiellement comme un plateau en pente douce entaillé sur quelques dizaines de mètres par des torrents encaissés. La surface, extrêmement plate de cette unité morphologique n'est pas structurale et les couches font avec la surface topographique moyenne un angle de 2° environ (2). Les conditions géographiques actuelles ne permettent pas d'expliquer cette morphologie.

.. -----

(1) Ces exemples seront examinés et discutés au chapitre suivant (figures 13 et 14).

(2) La pente moyenne du plateau est de 2°30' à 3° alors que le pendage moyen apparent (compte tenu des accidents tectoniques) est de 4°30'.

Quelle est l'origine de cette surface topographique ? L'altération profonde des roches du Keuper sous sa surface d'affleurement n'est accompagnée d'aucun témoin paléontologique connu comme des poches de sidérolithique et il est nécessaire de se référer aux données régionales pour avoir quelques précisions.

Aucune étude générale de l'évolution morphologique du bas Vivarais n'a jamais été entreprise mais quelques éléments sur les reliefs tertiaires ressortent des travaux de F. Roman (1934) et P. Grangeon (1960).

● F. Roman cite la poche d'alluvion de Melias (commune des Assions, à quelques kilomètres au Sud du secteur étudié) à *Tapirus arvernensis* DEV. et BOUIL. et *Mastodon arvernensis* CR. et JOB. qui permettent de définir une surface topographique moyenne du Pliocène moyen. Cette surface d'érosion présente des analogies dans sa forme et sa situation avec celle définie aux Estourels.

● P. Grangeon par ses études sur le massif volcanique des Coirons (à 25 kilomètres plus au Nord) et des sous-bassements pré-éruptifs, précise l'allure de la morphologie qui évolua du Miocène au Pliocène. Il définit une surface du Miocène supérieur à roches altérées en argiles rouges (illites et montmorillonites) et à vallées douces et largement ouvertes indiquant une morphologie molle. Ce n'est qu'ultérieurement que le relief, sous l'impulsion des grands effondrements régionaux (postérieurs au Pliocène inférieur) s'est accusé et a commencé à évoluer vers les formes actuelles.

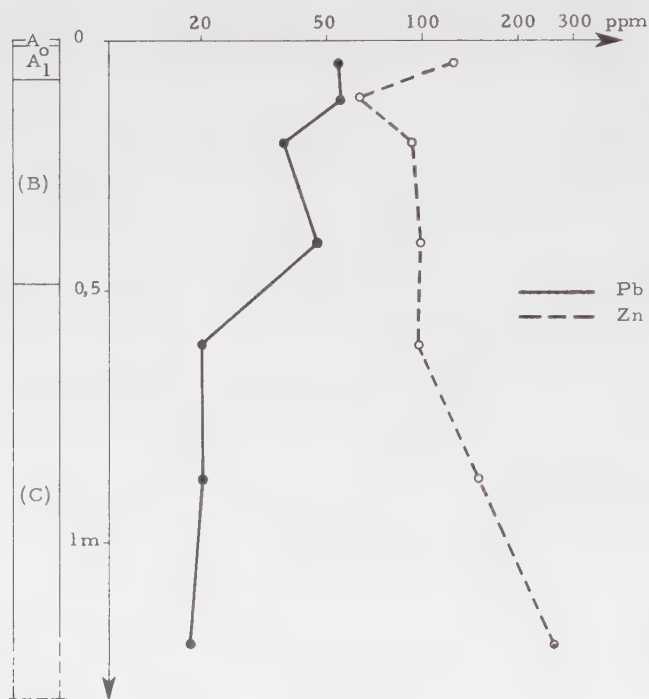


Figure 11 - Profil pédologique et géochimique d'un sol type de la région des Estourels.

Certaines des surfaces quaternaires remontent donc à une phase antérieure aux grands effondrements et c'est vraisemblablement le cas de la plateforme des Estourels (1). Ce vieux plateau à pente douce est recouvert par une forêt qui, à l'origine, semble avoir été à dominante de conifères mais où les châtaigniers puis les vergers et les vignes sont venus s'implanter. Sur les flancs des vallées et dans leur fond, les buis ont réussi à se maintenir sur des niveaux carbonatés, alors que sur le plateau, la dissolution des carbonates laisse des sols bien trop acides.

(1) L'analogie est confirmée par la comparaison des altitudes relatives des lambeaux de cette surface qui apparaissent à diverses altitudes de part et d'autre des grands accidents régionaux : il y a bien antériorité de la surface aux grands effondrements.

Malgré les perturbations créées par la mise en valeur de la grande majorité des surfaces, il est possible, en certains points, de reconnaître des sols du type sol brun tempéré acide caractérisés par un horizon (A) de 7 à 8 cm et un horizon (B) de 40 cm environ (figure 11).

2 - PRELEVEMENTS

Les travaux de prélèvements et d'analyses ont été réalisés par la Société Minière et Métallurgique de Peñarroya en 1964 et menés de la façon suivante :

a) MAILLE

Le phénomène recherché est anisotrope puisque allongé le long des directions tectoniques mais ces directions mêmes étant multiples (voir figure 22) aucune orientation privilégiée du réseau ne s'imposait d'elle-même. Dans ces conditions, une maille carrée de 50 m de côté a été choisie et les prélèvements ont été réalisés à chaque nœud du réseau. En l'absence de données concrètes sur la géométrie des anomalies recherchées, ce type de maille se justifiait (1).

En conclusion de la présente étude, après détermination des dimensions approximatives des anomalies recherchées, un aperçu sur la valeur de la maille employée sera donné.

b) PRELEVEMENTS

L'implantation du réseau de profils et des prélèvements a été réalisée à partir d'un agrandissement du fond I.G.N. au 1/25 000^e type à l'échelle du 1/5 000^e. Cette méthode, applicable dans les régions où existe la carte de ce type et où les repères topographiques sont suffisamment nombreux et caractéristiques est plus rapide qu'une implantation topographique du réseau alors que la précision demeure suffisante.

Les emplacements des prélèvements ont été repérés, soit directement à partir de la topographie, soit par interpolation ou extrapolation à partir des points repérés. La précision obtenue lors du report des points de prélèvements est mal définie et est bien entendu variable suivant les obstacles de la morphologie et de la végétation. Cependant, il semble que l'erreur se situe aux environs de 3 à 4 mètres et ne dépasse jamais 10 mètres. L'ordre de grandeur de ces erreurs sera précisé indirectement en conclusion de l'étude du périmètre des Estourelles.

Le mode de prélèvement (profondeur) n'a pas fait l'objet de recherches systématiques, attitude raisonnable car la mise en valeur de ce plateau a été jadis la cause de bouleversements importants : l'établissement de terrasses de culture, travaux qui s'accompagnaient de perturbations profondes des profils pédologiques. Bref, si la profondeur du prélèvement s'avère peu importante (figure 11), les sols ont cependant été systématiquement échantillonnés à une profondeur d'environ 20 cm ; les prises étaient de 100 à 150 g de sol débarrassé de ses cailloutis les plus grossiers.

3 - ANALYSE

La méthode employée est celle préconisée par le B.R.G.M. : la formation des dithizonates et leur titrage à vue. Le détail opératoire a été précisé par H. Grillot *et al.* (1964), et comprend :

- a - un séchage à l'étuve, un broyage sommaire et un tamisage à 120 meshes (2),

(1) L'absence de données sur la taille des anomalies possibles paraît en contradiction avec le choix d'une maille de 50 m donc déjà assez large. Mais il faut dès maintenant préciser que la détection de toutes les anomalies, ici, a peu d'intérêt et qu'un échantillon même très partiel de cette population suffit : le but essentiel est de distinguer les zones qui présentent une forte densité d'anomalie. Le problème est très différent dans le cas d'une minéralisation filonienne car alors la détection d'une forte proportion, voire de la quasi totalité des anomalies, s'avère nécessaire.

(2) Cette dernière opération est destinée à assurer une reproductibilité des prises bien meilleure que celle de l'analyse même.

b - une attaque chloronitrique à chaud,

c - la formation de dithizonate de plomb (1) et de zinc (2) qui sont titrés à vue par comparaison à des étalons.

La sensibilité maximum ainsi obtenue est de 10 ppm et la reproductibilité est de $\pm 7 \%$ pour le plomb et $\pm 12 \%$ pour le zinc. Cependant cette précision se révèle illusoire ainsi que le montre les contre-analyses systématiques effectuées qui donnent les écarts relatifs reportés sur le tableau V.

Écarts relatifs (en %)	0 à 5	5 à 10	10 à 20	20 à 40	40 à 80	80 à 120	> 120
Plomb	40	5	19	17	3	0	0
Zinc	18	7	14	21	21	3	0

Tableau V - Fréquence des écarts relatifs entre analyses et contre-analyses en plomb et en zinc.

La reproductibilité des analyses en zinc est, bien entendu, plus faible que celle du plomb. La séparation des résultats en deux domaines : 0 - 5 % et 10 - 80 % ne relève pas de deux processus différents d'erreur mais simplement du procédé sommaire de lecture : il y a regroupement en une même classe, donc sur une même valeur de deux teneurs différentes de quelques pourcents ; la contre-analyse enregistre alors très rarement des écarts de cet ordre.

4 - CONTRÔLES ET REPORTS

La nécessité de contrôles sévères ressort de la dispersion considérable entre analyses et contre-analyses. Si en principe un échantillon sur dix est repris en analyse de même que toutes les fortes valeurs observées, en cas de divergence trop profonde, la totalité des analyses est refaite.

Peut-on se contenter d'une telle précision pour mener à bien une prospection géochimique ? Il est, à ce stade du travail, impossible de répondre car tout dépend du contraste observé entre les anomalies retenues et le fond régional. Si l'exemple de Johnson Camp (figure 10) se traduit par des contrastes élevés (5 à 6), celui cité par C. Granier (1958) est bien plus délicat à mettre en évidence (contraste inférieur à 2). Ce n'est qu'après la caractérisation des anomalies que ce point sera précisé.

Les reports des valeurs se font séparément pour le plomb et le zinc sur les fonds topographiques au 1/5 000^e qui ont déjà servi à localiser les points de prélèvement. Un tel document brut est trop peu explicite et il convient de l'élaborer en faisant ressortir les domaines géochimiques ou mieux, le "relief" géochimique de la surface topographique.

Que signifie cette opération ? La distribution géochimique de surface peut être représentée par une fonction $F(x, y)$; cette fonction est continue (au sens mathématique du terme) car elle est dérivable en chaque point (3). Le prélèvement et l'analyse en donnent un échantillon, $f(x, y)$ qui aux nœuds du réseau coïncide avec elle.

Dans la pratique, on réalise un lissage empirique de la distribution par interpolation approximative entre deux nœuds voisins.

Trois critiques essentielles peuvent être adressées à cette méthode :

-
- (1) A pH 9,0 - 9,5 et en présence de cyanure de potassium pour éliminer les effets parasites du zinc.
 - (2) A pH 5,5 et en présence d'hyposulfite de sodium pour éliminer les effets du cuivre et du plomb.
 - (3) Si le phénomène de concentration géochimique en roche est discontinu à l'échelle de la dizaine de mètres, la dispersion superficielle "enrobe" les lignes de discontinuité et rend la surface dérivable.

- la définition des intervalles et la position des coupures restent empiriques alors que ces deux facteurs peuvent jouer un rôle important dans le tracé des cartes d'iso-teneurs.

- on utilise généralement une interpolation vaguement linéaire très peu justifiée en raison de la courbure de la surface. L'élimination de cette courbure peut être réalisée par le passage aux logarithmes, les interpolations sont alors mieux justifiées.

- le facteur humain reste important et l'expérience a maintes fois prouvé que les tracés réalisés par deux opérateurs différents variaient parfois considérablement (1).

Les résultats simplifiés des cartes de la campagne des Estourels (cartes obtenues par lissage empirique) sont représentées par les figures 12 A et B. Ces documents essentiels dans l'interprétation directe des campagnes serviront très peu ici : l'étude de la distribution spatiale des valeurs a conduit en effet à fort peu de résultats, voire à une impasse alors que l'aspect statistique de la distribution a, jusqu'ici, été négligé ; c'est précisément par ce biais que sera abordé le problème de l'interprétation.

5 - INTERPRETATIONS CLASSIQUES : LES ANOMALIES DE FUITE

M. Aubague *et al.* (1964) ont donné une interprétation détaillée partielle des campagnes tactiques effectuées dans l'Ardèche. Les exemples donnés (figures 13 et 14) semblent très concluants : l'hypothèse de migrations ascendantes et de diffusion superficielle des cations paraît traduire les phénomènes observés.

L'objection déjà évoquée par I.I. Ginzburg (1957) à propos d'un exemple de J.S. Webb réapparaît ici : a-t-on l'assurance que les phénomènes observés sont bien en relation avec une minéralisation du Buntsandstein ? Ne peut-il s'agir d'une anomalie diffuse dans un étage quelconque de la couverture ?

Ces exemples ne sont donc pas aussi convaincants qu'ils ne le paraissent *a priori* et à cette critique s'ajoute un certain nombre de faits que la théorie exposée explique mal.

6 - FAITS NON INTERPRETES : MISE EN CAUSE DE L'INTERPRETATION

Les anomalies mises en évidence par les campagnes de prospection tactique n'ont révélé jusqu'ici aucun amas minéralisé sous-jacent. Fait grave, car si l'on admet volontiers qu'au-dessus d'aires minéralisées, seules certaines fractures aient permis la circulation des cations lourds, on admet bien plus difficilement qu'une anomalie de fuite ne corresponde à aucune concentration.

De plus, avec la reconnaissance géochimique régionale, plusieurs niveaux stratigraphiques à teneurs élevées s'individualisaient. Outre le Buntsandstein et le Muschelkalk (niveaux porteurs de la minéralisation) c'étaient, à ce stade des investigations, l'Hettangien inférieur (minéralisation exprimée en sondage), le Lias moyen, et enfin le Bajocien où des traces de métaux lourds étaient détectés à l'affleurement.

Pouvait-on alors tenter d'expliquer l'ensemble des campagnes par l'affleurement de niveaux à faibles teneurs ? Ou bien fallait-il considérer le problème avec plus de nuances et essayer de dissocier les effets des niveaux minéralisés de ceux de fuites plus profondes ?

C - ESSAI D'ANALYSE DE LA CAMPAGNE DES ESTOURELS

La campagne des Estourels se prêtait admirablement bien à des investigations fines et à une analyse approfondie du phénomène et des interprétations proposées ; le périmètre couvre en effet un domaine géologique uniforme où pratiquement seul le Keuper affleure et où de très fortes anomalies apparaissent.

(1) Les divergences entre opérateurs apparaissent essentiellement dans les zones d'indétermination. Ce sont précisément là les domaines les plus dangereux à interpréter.



Figure 12 A - Carte simplifiée des isoteneurs en plomb de la région des Estourels (d'après des documents de la Société Peñarroya).

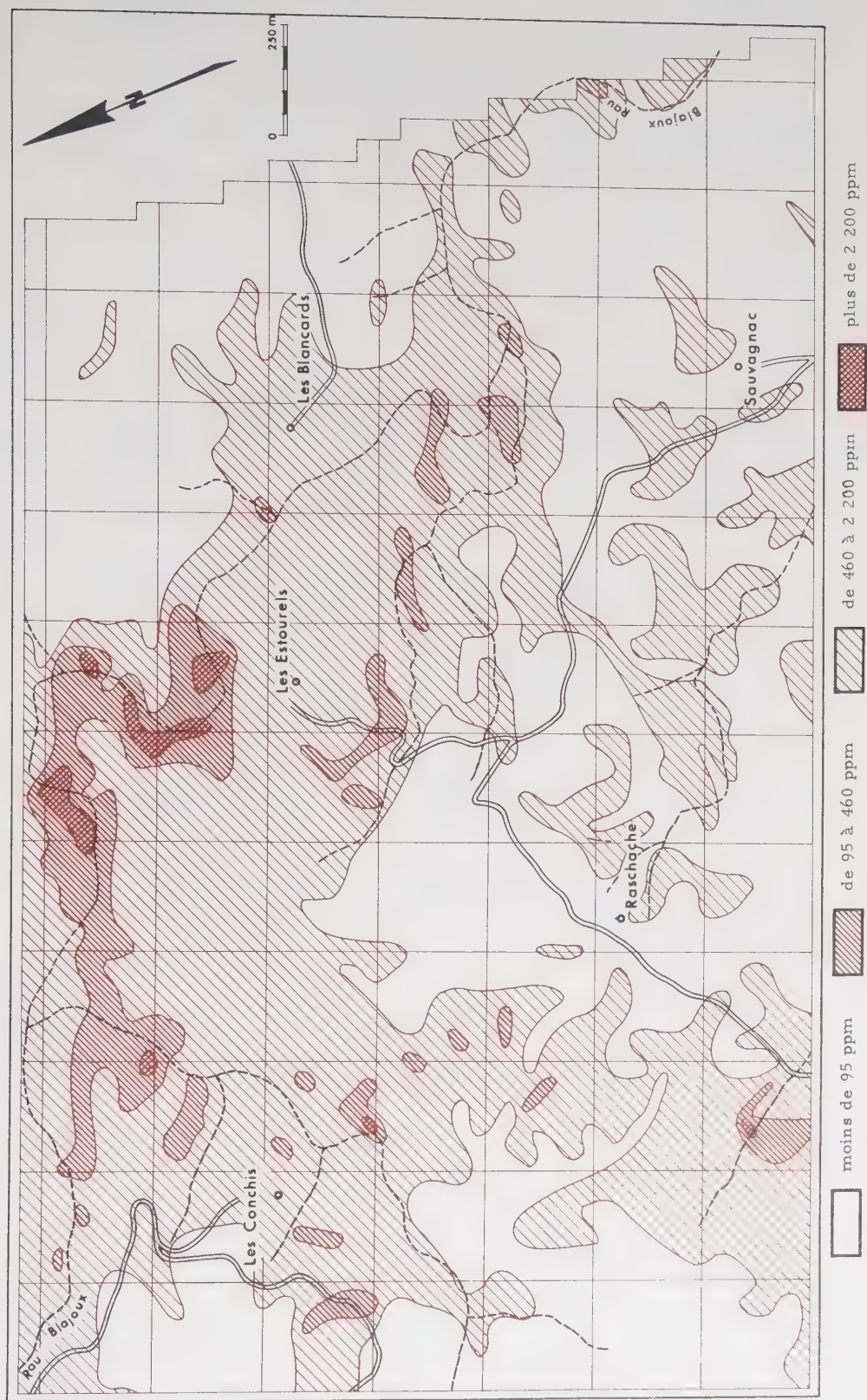


Figure 12 B - Carte simplifiée des isoteneurs en zinc de la région des Estourels (d'après des documents de la Société Pénarroya).

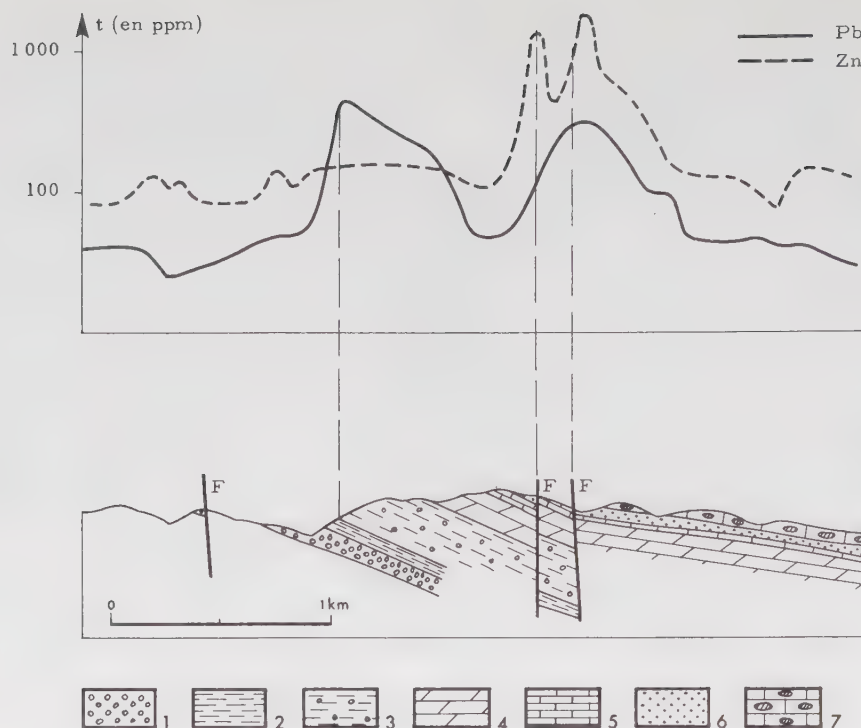


Figure 13 - Coupe géologique et géochimique (d'après M. Aubague *et al.* 1964).

1/ Buntsandstein - 2 / Muschelkalk - 3/ Keuper - 4/ Hettangien-5/ Sinémurien (?) - 6/ Lias moyen et supérieur - 7/ Bathonien inférieur.

Il faut remarquer sur cet exemple :

- que la minéralisation aurait mieux migré verticalement sur 500 m de dénivellée et par l'intermédiaire d'une faille, qu'horizontalement sur 1100 m par l'intermédiaire de l'horizon porteur, au demeurant assez perméable.
- que la superposition des deux anomalies de fuite avec les deux affleurements du Lias moyen et supérieur est meilleure qu'avec les deux traces des failles. L'anomalie de cette formation n'est pas sans relation avec un indice minéralisé trouvé très récemment à quelques kilomètres de là.

L'ordre chronologique des différentes étapes de ce travail d'analyse a été peu différent de l'ordre logique de déroulement des opérations qui sera adopté ici. La campagne de prospection tactique fut menée par la Société Peñarroya au début de 1964, les travaux de terrain (en vue d'une interprétation des problèmes) durant l'été 1964, les sondages et l'interprétation définitive au cours de l'hiver 1964-1965.

1 - DISTRIBUTIONS

a) DONNEES NUMERIQUES

Le prélèvement et l'analyse en plomb et en zinc (par la méthode indiquée) de 2750 échantillons de sols fournissent les données précises sur la distribution superficielle locale des deux métaux.

Les deux populations ainsi obtenues présentent toutefois le défaut d'être assez mal précisées dans les gammes des fortes et faibles valeurs : les échantillons de plus de 5000 ppm sont considérés comme intitrables alors que les valeurs inférieures à 40 ppm ne sont pas différenciées. Le grand étalement des valeurs et la proportion de valeurs élevées incitent *a priori* à utiliser une distribution logarithmique et laissent à penser que les lois de distribution sont log-normales.

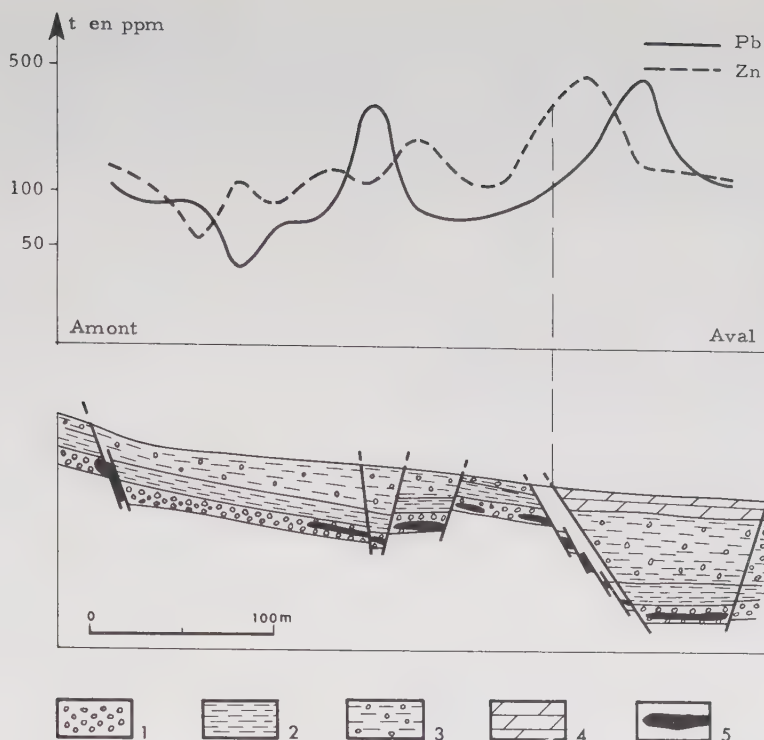


Figure 14 - Région de Largentière. Teneurs dans les échantillons pris à la faveur du réseau hydrographique dans une zone minéralisée (d'après M. Aubague *et al.*, 1964). Résultats de l'échantillon central.

1/ Buntsandstein - 2/ Muschelkalk - 3/ Keuper - 4/ Hettangien - 5/ Minéralisation.

L'anomalie principale en plomb et en zinc se situe bien en aval d'une faille, mais cet accident fait apparaître des dolomies de l'Hettangien inférieur, niveau où l'on connaît des minéralisations diffuses, voire quelques petites concentrations.

b) HISTOGRAMMES ET COURBES DE DENSITE DE PROBABILITE

Pour établir un histogramme précis il faut déterminer deux paramètres : intervalle de classe et position d'une quelconque des classes (c'est-à-dire en pratique l'abscisse du milieu de la première classe).

L'intervalle de classe joue un rôle prépondérant : trop étroit, il soulignera les discontinuités de la distribution (1) et donnera des modes parasites ; trop large, il intégrera trop de facteurs et neutralisera les zones de pics et de creux. La position des coupures joue un moindre rôle mais comme on opère la superposition d'une classification discontinue (coupures) à une distribution du même type (résultats d'analyse), il peut se produire des atténuations et des déplacements des zones de maximum et de minimum, lors d'une translation des coupures.

Pour tenir compte de l'un et l'autre facteur, une méthode de moyenne mobile à intervalle variable a été employée.

Pratiquement l'intervalle logarithmique entre valeurs maximales et minimales (2,05) a été subdivisé en 41 intervalles élémentaires de 0,05 qui donnent bien entendu des histogrammes totalement hachés.

Les histogrammes obtenus par moyenne mobile en prenant des intervalles multiples ont été réalisés avec les multiples suivants :

- Plomb : 4, 5, 6, 7, 8, 9 - Zinc : 3, 4, 6, 7, 8, 9

(1) La distribution des valeurs géochimiques est, à l'échelle de travail, un phénomène continu, mais le procédé d'analyse et la lecture à vue font regrouper les valeurs en classes qui correspondent aux valeurs des étalons et à leurs multiples (après dilution de l'échantillon). La distribution observée est donc bien polymodale.

Ce procédé conduit à une famille d'histogrammes ; il faut alors choisir entre les représentations trop hachées et celles qui s'avèrent trop "molles". Empiriquement, des considérations de continuité de courbe et de séparation maximum des détails ont servi de critère dans le choix de la meilleure représentation, donc de l'intervalle optimum. Les meilleurs résultats correspondent à des intervalles de 0,40 soit 8 intervalles élémentaires aussi bien pour le plomb que pour le zinc. Le lissage alors aisé des histogrammes conduit aux courbes de densité de probabilité des valeurs en plomb et en zinc (figure 15).

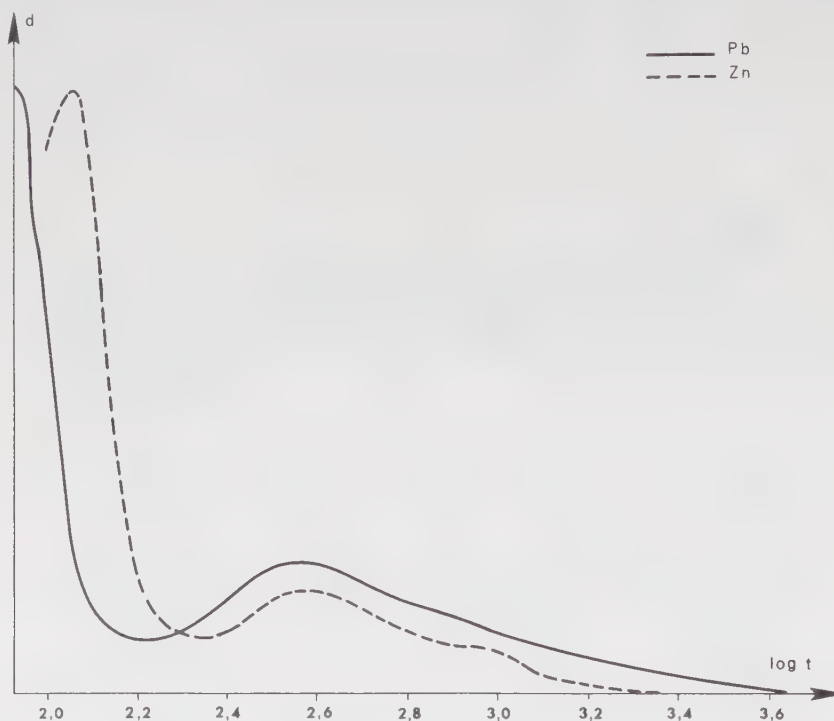


Figure 15 - Courbes de densité de probabilité (d) des teneurs (t) en plomb et en zinc. Résultats du lissage des histogrammes par moyenne mobile avec intervalle de 0,40.

c) PREMIERE INTERPRETATION

Le simple examen des courbes obtenues montre que la densité de probabilité résulte de la superposition de 3 phénomènes élémentaires dont les maximums se situent aux environs de :

- 1,90 (80 ppm), 2,60 (400 ppm), et 3,00 (1000 ppm) pour le plomb,
- 2,05 (110 ppm), 2,60 (400 ppm), et 3,10 (1200 ppm) pour le zinc,

Lors de l'établissement de ces histogrammes, l'existence des 3 phénomènes superposés apparaissait quel que soit le choix des intervalles : l'existence des 3 populations est donc réelle, les différents essais ne visaient qu'à mieux définir la position et l'amplitude des 3 ensembles, en aucun cas l'existence d'un maximum secondaire ne peut être considérée comme un artefact dû à une coupure particulière (1).

Dorénavant ces 3 ensembles s'appelleront (I), (II) et (III) pour le plomb et (I'), (II') et (III') pour le zinc.

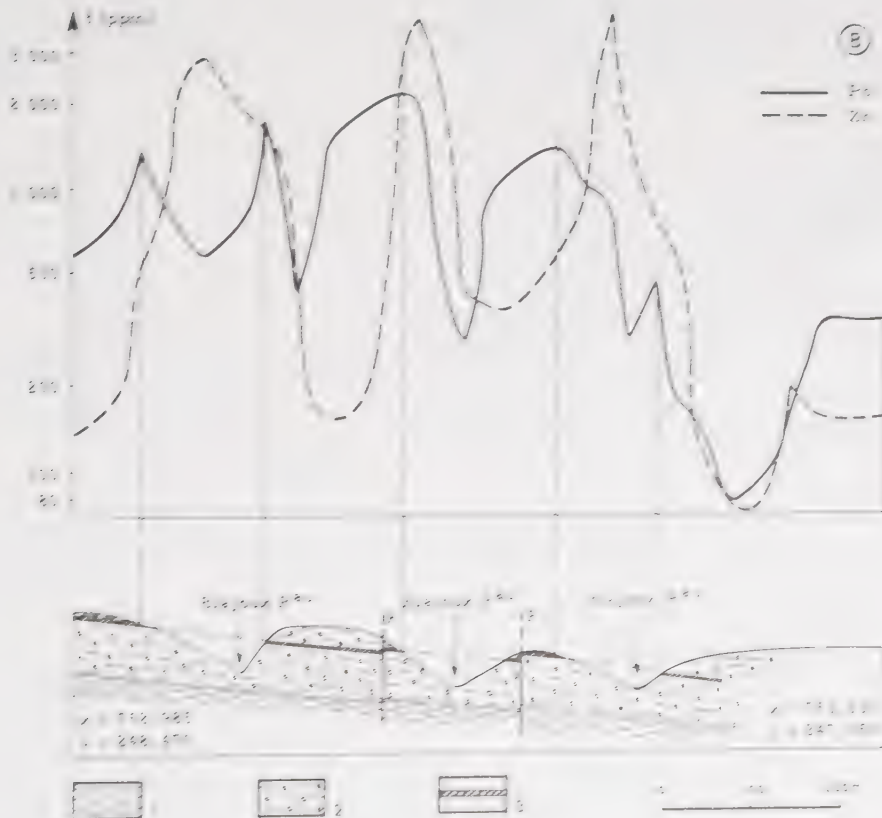
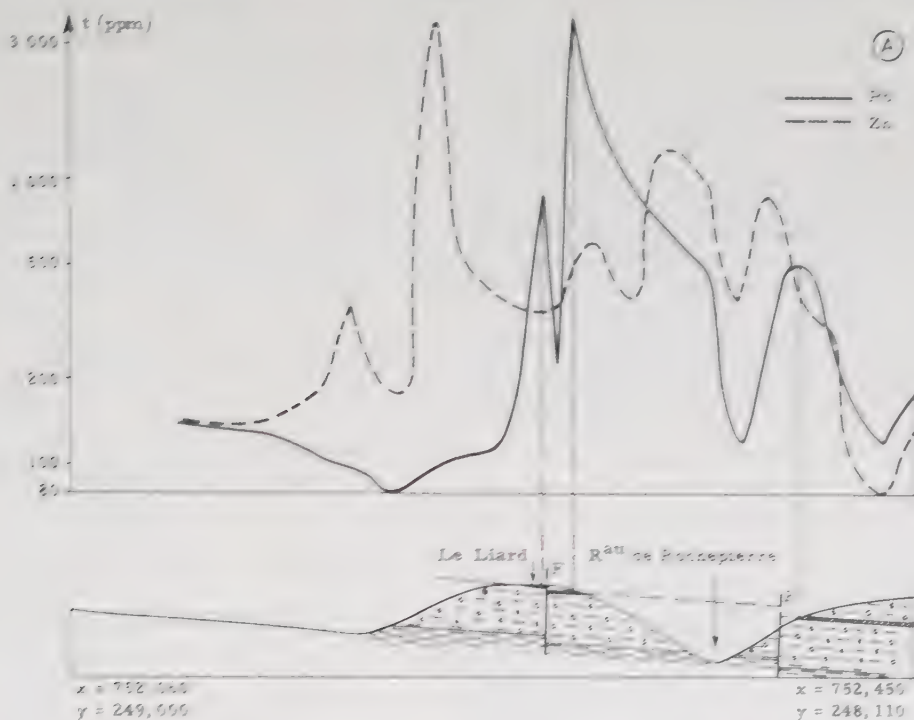
-
- (1) La réelle démonstration de cette proposition sortira de la suite de cette analyse : les populations (II) et (II') correspondent à un phénomène géologique bien défini.

Figure 16 - Schéma des corrélations entre les coupes géochimiques et géologiques : A, entre le Fayet et Rochepierre ; B, au Nord des Estourels.

1/ Muschelkalk - 2/ Keuper - 3/ Couche porteuse présumée.

Les pics principaux des teneurs en plomb apparaissent à l'affleurement d'un niveau situé toujours dans la même position lithostratigraphique alors que les pics des teneurs en zinc sont systématiquement décalés vers l'aval avec un maximum de 70 mètres.

A l'évidence, les populations (I) et (I') correspondent au fond géochimique local alors que les populations (II), (II'), (III) et (III') doivent correspondre à des phénomènes bien particuliers, mais à ce stade de travail on ne peut même pas révéler l'accumulation entre (II) et (II') ni (III) et (III')



malgré les analogies entre ordre de grandeur. Il est impossible d'aller plus avant à partir de ces simples données : toute hypothèse complémentaire risquerait d'être trop loin des réalités ; il convient maintenant de se tourner vers des données géologiques plus complètes.

2 - DONNEES COMPLEMENTAIRES

Les cartes d'isoteneurs en plomb et en zinc (figures 12 A et B) font apparaître une localisation très marquée des anomalies dans le Nord de la campagne et une disparition progressive vers le Sud-Est. Cette distribution régionale des anomalies pourrait-elle simplement traduire l'enfouissement progressif vers le Sud-Est d'un niveau minéralisé situé dans le Keuper ? Ce serait ramener le phénomène de distribution régionale à l'hypothèse évoquée à propos des exemples décrits par M. Aubague *et al.* et cités précédemment.

Le Keuper qui affleure sur toute l'étendue du plateau des Estourels se prête très mal à des investigations géologiques fines. En effet, le caractère pararythmique de la série rend toute lithostratigraphie extrêmement difficile, voire impossible, et la couverture végétale et pédologique ne permet pas de suivre un banc donné. De plus, de très nombreux accidents tectoniques de faible rejet (quelques mètres en général) ne permettent pas les interpolations. Cependant la reconnaissance à grande échelle de quelques rythmes caractéristiques, le dépouillement approfondi des photographies aériennes et l'étude microtectonique locale se sont traduits par une reconstitution de la structure du Nord du périmètre.

La corrélation géologie - géochimie tentée alors (figure 16) semble pouvoir s'interpréter par l'existence d'un niveau à forte teneur géochimique situé à environ 50 ou 60 m au-dessus du toit du Muschelkalk. Le phénomène ressort très bien des profils des teneurs en plomb, alors que les teneurs en zinc apparaissent beaucoup plus aléatoires : elles peuvent cependant très bien dériver des anomalies stratiformes par entraînement le long de pentes localement très marquées (Anderson et Hawkes, 1958), c'est ce qui semble ressortir de leur position avals en regard des anomalies en plomb.

Les pics principaux sont liés à la présence de ce niveau mais les anomalies semblent s'élargir à proximité des failles (figure 16) ; elles se présentent alors en taches diffuses et non en pics marqués.

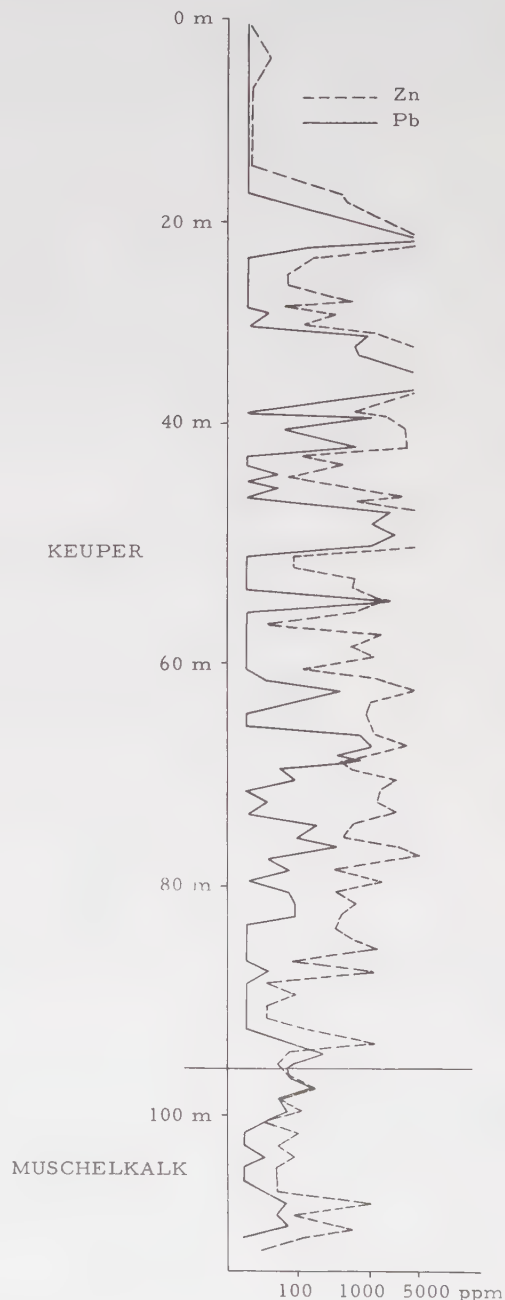


Figure 17 - Profil géochimique du Keuper du sondage des Estourels. L'anomalie majeure apparaît entre les cotes 20 et 80, c'est-à-dire, en tenant compte du pendage moyen, dans les 70 mètres qui surmontent le Muschelkalk.

Par la suite, l'existence d'une minéralisation stratolite du Keuper a été confirmée par l'étude d'une série de 5 sondages ayant traversé cet étage : dans trois d'entre eux des mouches de galène ont été observées ainsi que dans d'autres sondages situés à quelques km de là. L'allure de la distribution des teneurs a été précisée par l'établissement d'un profil géochimique du Keuper du sondage des Estourels ($x = 752,880$; $y = 247,690$) (figure 17). L'anomalie existe bien, elle se situe à l'emplacement prévu avec une précision très acceptable ; elle est toutefois moins localisée que les conclusions de l'étude de terrain ne le laissait prévoir (1).

Les résultats d'un seul sondage s'avèrent toutefois tout à fait insuffisants pour préciser la position et l'intensité d'une anomalie : la distribution des métaux est bien trop capricieuse et seuls le niveau stratigraphique approximatif et l'ordre de grandeur des teneurs doivent être retenus.

Les données complémentaires obtenues confirment donc, qu'outre le fond géochimique, une deuxième population est présente : celle des anomalies stratiformes. Peut-on lui assigner un ordre de grandeur des valeurs ? La figure 16 met en évidence des teneurs de l'ordre de 1 000 à 3 000 ppm ; ce groupe d'anomalies pourrait donc correspondre aux populations (III) et (III') précédemment définies.

Quelle serait alors la signification des populations (II) et (II') ? Pourraient-elles correspondre à des anomalies de fuite soit du Buntsandstein, soit du Keuper ?

Ce sera là une hypothèse de travail dont la précarité n'échappe pas, mais le problème est délicat et à ce stade aucune donnée supplémentaire ne peut renseigner plus précisément. Avant tout, il convient de tenter d'isoler le phénomène (II).

3 - INTERPRETATION DES DISTRIBUTIONS

Trois phénomènes se superposent donc pour donner les distributions observées, mais le seul examen des courbes de densité de probabilité (figure 15) montre bien le chevauchement des différentes distributions. Pour caractériser la population (II) (2), il faut pouvoir l'isoler à la fois du fond local et des anomalies stratiformes. Si on peut raisonnablement penser que des valeurs de l'ordre de 400 ppm en zinc et de 310 en plomb appartiennent en propre à la population (II), on est cependant bien vite limité par l'indétermination des autres valeurs.

Toutefois, à l'aide d'hypothèses simplificatrices (dont la validité sera vérifiée et discutée) il est possible d'aller plus avant et de bien caractériser cette population.

a) DECOMPOSITION DES COURBES

Dans l'hypothèse d'une distribution globale résultant de la somme de trois distributions élémentaires d'un type donné, on démontre que la décomposition de la densité de probabilité est unique. Peut-on poursuivre les investigations en faisant des hypothèses vraisemblables sur une loi de référence et en se ménageant une possibilité de vérification de leur validité ?

La majorité des études des types de distribution a été conduite sur les distributions en roche des oligo-éléments, beaucoup plus rarement sur les distributions en sols. Cependant le phénomène pédologique agissant comme facteur de concentration ou de dispersion, on peut admettre une distribution de même type pour les sols ; le facteur superficiel se traduit alors par une translation (dans le cas des distributions logarithmiques) ou par un étalement plus grand (dans le cas des distributions normales).

La littérature abonde de publications à propos des lois de référence : L.H. Ahrens (1954 a et b), F. Chayes (1954), R.L. Miller et E.D. Goldberg (1955) se livrent à des discussions à propos des lois normales et lognormales sans qu'aucune loi de référence ne puisse rallier la totalité des

(1) Les niveaux représentant l'accumulation métal la plus importante se situent entre les cotes 20 et 50 m du sondage, c'est-à-dire dans les 77 m au-dessus du toit du Muschelkalk. Sur le terrain, seule la cote supérieure de la minéralisation apparaît nettement, ce qui est normal vu le contraste maximum qu'elle offre. L'écart entre le résultat prévu (60 m) et observé (77 m) est-il dû à un déplacement très certain du plomb le long des fortes pentes où est repéré le niveau anomal ou bien à une simple irrégularité de la position lithostratigraphique du toit de la minéralisation.

(2) En raison de l'identité des causes des populations (I) et (I'), (III) et (III') on peut admettre une même cause pour (II) et (II') et l'une et l'autre population sera désormais appelée (II) sans distinction de métal. L'assimilation est confirmée par le pourcentage relatif des populations en plomb et en zinc (voir figure 18).

suffrages. Peu importe, la loi de référence est un instrument très souple qui doit répondre des particularités des distributions observées ; la cohérence ou l'incohérence des résultats est encore le meilleur critère de justification.

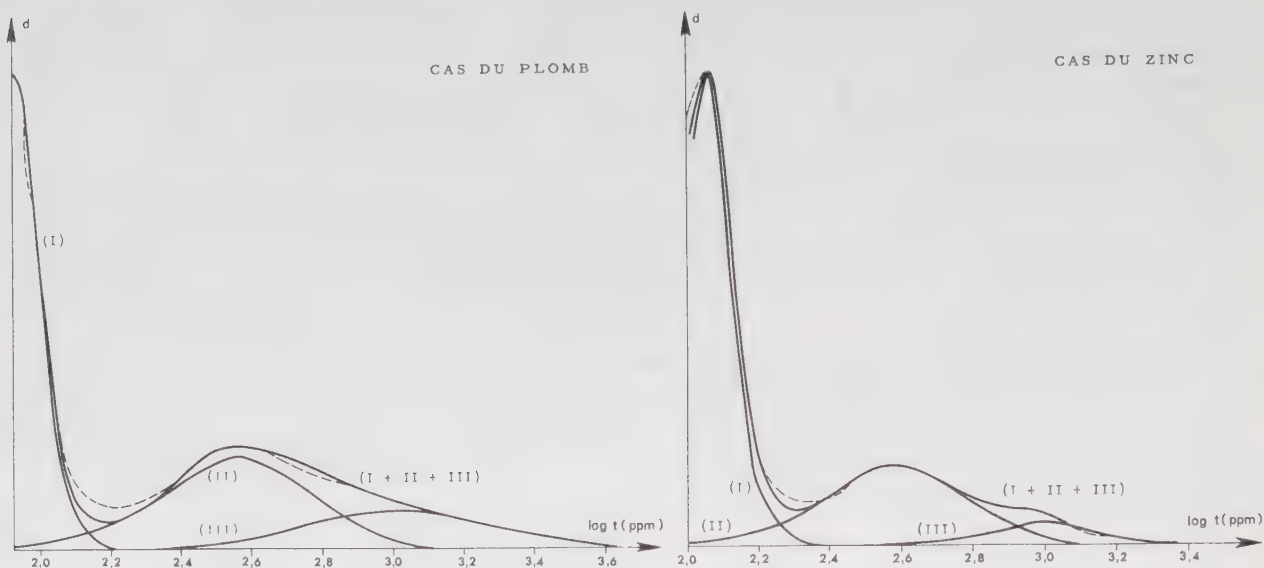


Figure 18 - Résultats de la décomposition des courbes de distribution des valeurs d'analyses.

Les courbes en traits pleins indiquent les distributions théoriques dont la somme s'écarte peu de la distribution réelle (en pointillés). L'égalité de pourcentage des aires d'un même groupe pour le plomb et pour le zinc représente deux contraintes supplémentaires, mais confirme ici la validité de la décomposition et de l'assimilation des populations élémentaires.

Dans cet esprit, et d'après l'allure des histogrammes, la loi lognormale fut choisie comme loi de référence, et dès lors, le problème de la décomposition des courbes était entièrement déterminé (1). C'est ce qui ressort d'ailleurs de la décomposition réalisée graphiquement par essais systématiques de superposition de familles de courbes normales d'écart-type variable (figure 18).

Les essais furent, de fait, très peu nombreux ; le problème fut parfaitement déterminé et le tâtonnement de l'ajustement porta très vite sur des variations d'écart-type de moins de 10 % et la position des moyennes sur des variations de logarithme de 0,02.

Pratiquement, les diverses populations en présence sont caractérisées par les données du tableau VI.

Populations	Plomb			Zinc		
	Moyenne (log)	Moyenne (en ppm)	Ecart-type	Moyenne (log)	Moyenne (en ppm)	Ecart-type
(I)	1,91	79,6	0,10	2,05	112	0,11
(II)	2,56	363	0,20	2,58	380	0,20
(III)	2,99	977	0,20	2,99	977	0,10

Tableau VI - Résultats de la décomposition graphique : caractéristiques des populations en plomb et en zinc.

L'écart final entre la somme des 3 distributions et la courbe expérimentale de densité de probabilité établie précédemment est faible et très admissible (figure 18).

(1) Il n'est pas nécessaire d'admettre comme F.F. Langford (1965) que les écarts-types des distributions du fond et des anomalies soient les mêmes ; les résultats qui suivent montrent que le choix d'écarts-types différents est de loin préférable.

En conclusion, sous réserve de validité de plusieurs hypothèses (lois de référence, unicité de la décomposition) et avec une légère imprécision, les distributions des valeurs en plomb et en zinc sont caractérisées par la superposition de 3 populations lognormales définies dans le tableau VI.

b) PROBABILITE D'APPARTENANCE D'UNE VALEUR

L'opération précédente a substitué, à des distributions expérimentales, des définitions mathématiques bien plus propices à la suite des investigations bien qu'aucun obstacle théorique ne s'oppose à une suite menée à partir des données initiales.

Le problème qui se pose alors est classique : c'est celui de la classification d'un individu extrait au hasard d'une des populations auxquelles il peut appartenir. La question peut se traiter par la généralisation à 3 populations de la fonction discriminante de R. A. Fischer (Deltheil et Huron, 1959), mais il a paru ici plus simple de chercher une solution par un procédé semi-graphique rendu possible par la simplicité des lois de référence et par la constatation que les populations (I) et (III) n'ont pratiquement aucune zone de recouvrement et qu'il est ainsi possible d'envisager les populations deux à deux (1).

Le problème est classique : soit deux courbes de densité de probabilité (I) et (J) résultant de la décomposition d'une distribution (I + J) (figure 19). Soit a une teneur qui puisse être commune à (I) et (J) et s_i et s_j les aires du domaine $t > a$ limitées par l'axe des t et les courbes (I) et (J). La probabilité pour qu'une valeur t , supérieure à a relève du phénomène (I) est :

$$P_i = \frac{s_i}{s_i + s_j}$$

et du phénomène (J) :

$$P_j = \frac{s_j}{s_i + s_j}$$

(l'échantillon appartenant à l'une ou l'autre population, la somme des deux probabilités est bien égale à l'unité).

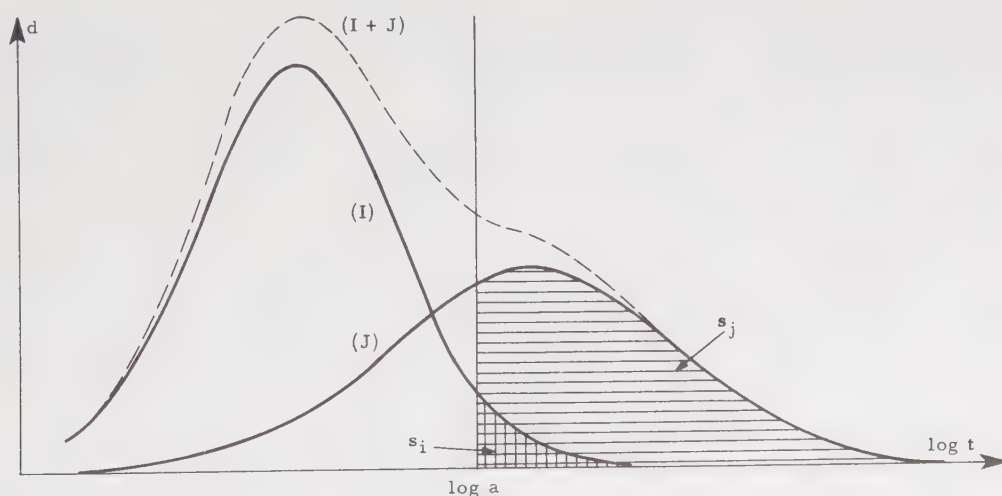


Figure 19 - Représentation de la probabilité d'appartenance d'une valeur à une population. Deux populations (I) et (J) sont représentées par leurs courbes de fréquence de même que la population (I + J), somme des deux phénomènes élémentaires. La probabilité pour qu'une valeur t supérieure à a appartienne à (I) et non à (J) est mesurée par le rapport : $\frac{s_i}{s_i + s_j}$.

L'expression mathématique des distributions étant connue, il sera plus pratique de calculer s_i et s_j au moyen d'une table de la loi normale que d'évaluer graphiquement le rapport des aires.

(1) Cette proposition n'est bien évidemment vraie que si l'on néglige les très faibles densités de probabilité.

en effet, le domaine de discussion est celui des fortes probabilités et les rapports correspondants des surfaces s'avèrent difficiles à mesurer quel que soit le moyen employé (1).

L'application de ce principe à l'individualisation du groupe (II) par rapport à (I) et (III) a été mené parallèlement pour le plomb et pour le zinc en calculant les probabilités d'appartenance pour une série de valeurs de a .

La valeur de la probabilité varie bien entendu en fonction de la valeur choisie pour le paramètre a et les résultats obtenus permettent de tracer les courbes $P = f(a)$ (figure 20).

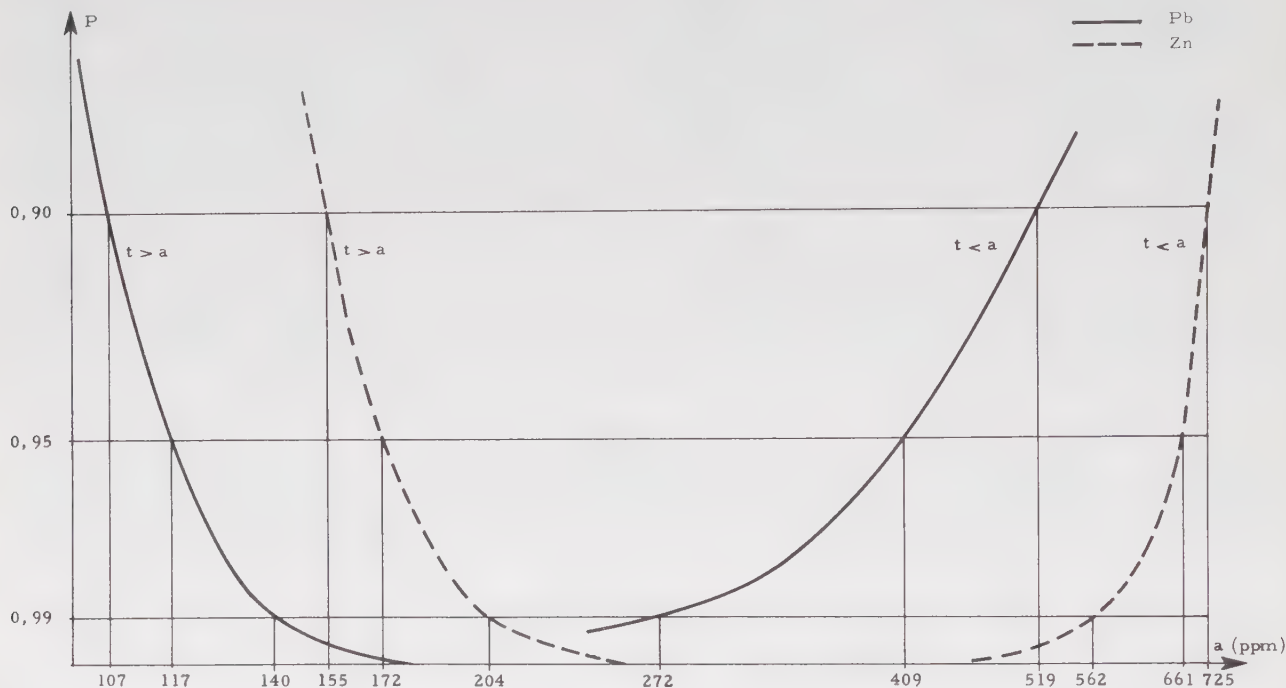


Figure 20 - Courbes de probabilité d'appartenance (P) à la population (II) d'une valeur t en fonction du seuil de coupure a . Pour t supérieur à a , la probabilité est celle d'appartenance à (II) et non (I) ; pour t inférieur à a , c'est celle d'appartenance à (II) et non (III).

Il est alors possible de déterminer les coupures supérieures et inférieures à adopter pour qu'une valeur comprise dans ces intervalles ait une probabilité P donnée d'appartenir au groupe (II).

c) COUPURES CHOISIES - CARTES D'ANOMALIES DU TYPE (II)

Les coupures choisies pour individualiser le phénomène (II) dépendant de la rigueur avec laquelle on veut le définir. Pour échapper à cette difficulté, plusieurs "qualités de définition" ont été retenues ; elles correspondent aux seuils de probabilité minimum de 99, 95 et 90 %. Les courbes de probabilité et les résultats qui en découlent sont représentés par la figure 20 et le tableau VII.

A partir de ces résultats, individualiser le type II en tant que domaine géographique de répartition et non plus en tant que population devient immédiat. En d'autres termes, il est désormais possible de sélectionner sur les cartes initiales de valeur les nœuds du réseau où apparaît le phénomène (II). Pour ne pas perdre le bénéfice de distinction des différents seuils de probabilité, la discrimination précédente est maintenue et les cartes font apparaître les anomalies du type (II) en plomb et en zinc définies aux seuils de probabilité de 99 %, 95 % et 90 % (figures 21 A et B).

(1) Toutefois, le calcul réalisé à partir d'une table de la loi normale fait intervenir le rapport du nombre total d'individus de chaque population, donc le rapport des aires totales de chaque courbe ; ce rapport a été évalué graphiquement, mais l'inconvénient cité pour le domaine des fortes probabilités n'existe plus dans ce cas.

Seuil de probabilité	Plomb			Zinc		
	99 %	95 %	90 %	99 %	95 %	90 %
<u>coupures en log</u>						
- inférieures	2,146	2,070	2,030	2,310	2,235	2,189
- supérieures	2,435	2,612	2,715	2,750	2,820	2,860
<u>coupures en ppm</u>						
- inférieures	140	117	107	204	172	155
- supérieures	272	409	519	562	661	725

Tableau VII - Coupures nécessaires à l'individualisation des populations (II) à différents seuils de probabilité.

A vrai dire, ces cartes sont peu parlantes mais les opérations suivantes vont permettre une confrontation entre la discrimination réalisée et une réalité géologique.

d) INTERPRETATION DES ANOMALIES SELECTIONNEES

Les données préliminaires et complémentaires laissaient soupçonner une identification du groupe (II) au phénomène d'anomalies de fuite. Il est temps maintenant après la sélection opérée, de vérifier cette hypothèse.

L'idée première pourrait être de situer les anomalies par rapport aux fractures repérées. Ce serait une vérification directe mais qui ne tiendrait aucun compte d'un phénomène classique : le déplacement des anomalies sous l'effet des écoulements des sols et des circulations d'eau. Bref, sur les terrains en pente, il y a décalage entre l'anomalie et sa cause sous-jacente.

Comme il est presque impossible de chiffrer ce déplacement, il est primordial d'éliminer maintenant les anomalies n'ayant pas subi de migrations horizontales, c'est-à-dire pratiquement celles pour lesquelles les maximums en plomb et zinc coïncident (figure 23). Donc, en superposant les cartes d'anomalies (plomb et zinc) du groupe (II), et en ne retenant que les points communs aux deux cartes, on peut espérer mieux cerner le problème de la localisation des causes de ces anomalies.

Mathématiquement, cette opération revient à évaluer la probabilité d'appartenance à un phénomène donné d'un prélèvement défini par ses valeurs en plomb et en zinc. Mais *a priori* et en toute logique, ces deux variables ne sont pas indépendantes (1) et la probabilité d'appartenance simultanée n'est pas le produit des probabilités définies auparavant.

Cependant, pour simplifier le problème et pour ne pas perdre le bénéfice de la distinction des différents seuils utilisés jusqu'ici, 4 groupes de prélèvement ont été individualisés :

- a - superposition de deux anomalies définies à 99 %
- b - superposition de deux anomalies : l'une définie à 99 %, l'autre à 90 ou 95 %
- c - superposition de deux anomalies : l'une définie à 90 %, l'autre à 90 ou 95 %
- d - nœud banal du réseau.

Ces groupes correspondent à une définition très bonne (a), moyenne (b et c) et nulle (d) du phénomène d'anomalie enracinée ; c'est une classification empirique des probabilités combinées.

Les résultats de cette nouvelle sélection apparaissent sur la figure 22 et traduisent une répartition *a priori* quelconque des anomalies sélectionnées : il convient donc de confronter cette distribution à une réalité concrète.

(1) La couche porteuse est minéralisée en plomb et en zinc (voir figure 17) et son affleurement régit la distribution des teneurs de surface. Toutefois, un diagramme de corrélation "plomb-zinc" montre la très faible liaison spatiale de ces deux variables.

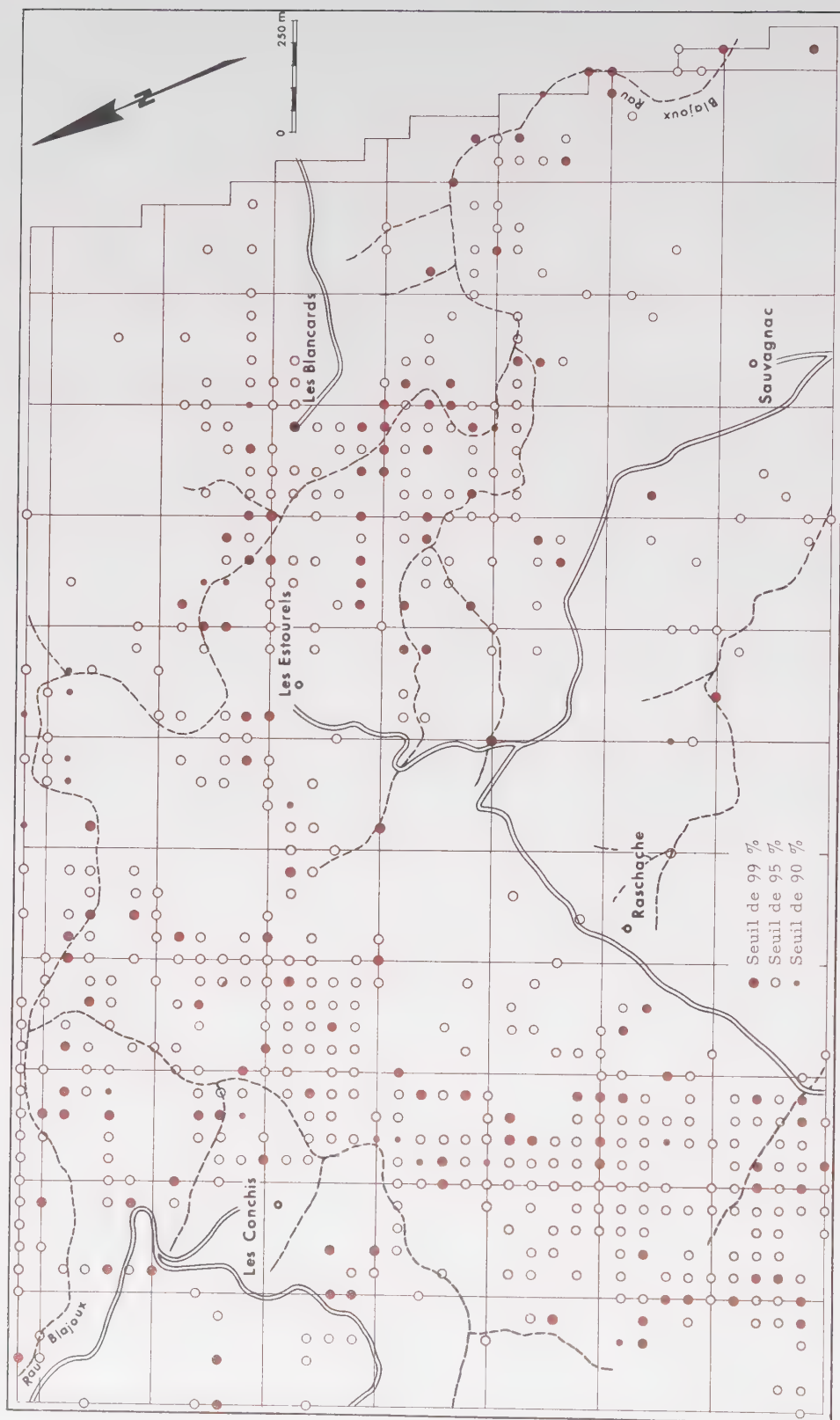


Figure 21A - Carte des anomalies en plomb du type (II) après sélection.

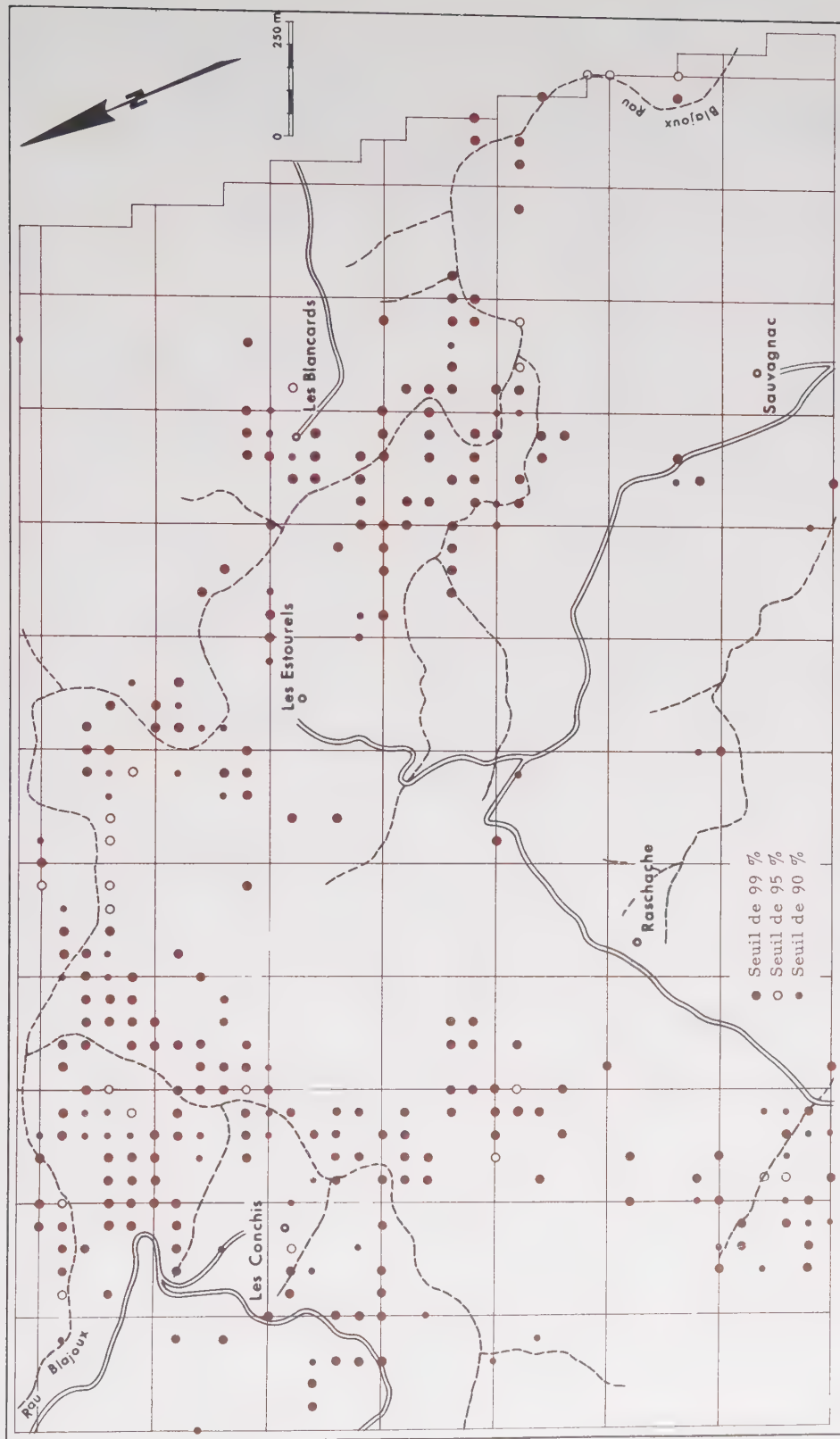


Figure 21B - Carte des anomalies en zinc du type (II) après sélection.



Figure 22 - Carte des anomalies enracinées et des fractures.

Les trois groupes définis (a), (b) et (c) seuls sont représentés ; le quatrième (d), nœuds quelconques du réseau, est constitué de tous les points de prélèvement.

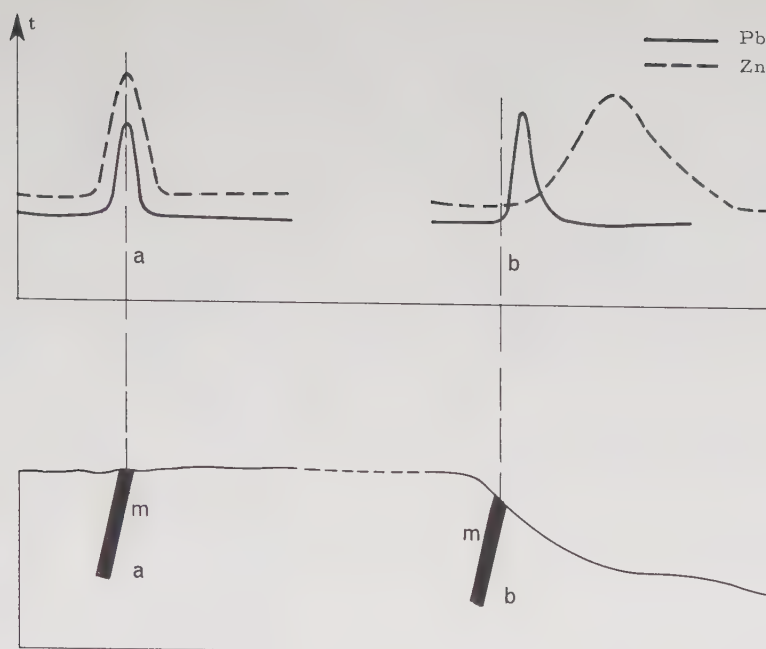


Figure 23 - Schéma de la coïncidence des anomalies à l'aplomb de la minéralisation (m) et de leur séparation en cas de migration. La migration d'une anomalie, qu'elle soit d'origine mécanique et chimique (cas des reliefs marqués) ou purement chimique (écoulement à travers un sol sub-horizontale), provoque toujours une séparation des pics. Le cas des migrations purement mécaniques est à éliminer au vu des conditions climatiques et du relief. Le meilleur critère d'enracinement d'une anomalie est bien la coïncidence des pics en plomb et en zinc.

Tout au long des investigations liées à ce travail, le rôle des failles dans de possibles anomalies de fuite a été avancé à titre d'hypothèse. A ce stade d'avancement, il est possible de vérifier si la distribution des anomalies du groupe (II) dépend de la tectonique locale.

La couverture des sols ne permet pas d'établir une carte tectonique complète et sûre, aussi la photo-géologie très détaillée a-t-elle servi à l'établissement d'une carte des directions tectoniques. Un contrôle de terrain aussi précis que les conditions d'observation le permettaient à vérifié la bonne qualité des résultats et justifie l'utilisation faite de ce document.

La superposition de la carte phototectonique et de la répartition des anomalies apparaît sur la figure 22. Au vu de cette carte, les anomalies du groupe (a) apparaissent nettement liées aux fractures ; mais pour préciser la relation, un dépouillement de la carte a été entrepris.

Les courbes de probabilité des distances d'une anomalie à la fracture la plus proche ont été établies pour les anomalies des 3 catégories et pour des points normaux du réseau ; elles montrent clairement une localisation préférentielle des anomalies sélectionnées à proximité des fractures (figure 24). Cette préférence s'amoin-drit vite avec la définition de l'anomalie mais la différence entre les courbes a et d est significative : les opérations successives ont bien isolé des anomalies géométriquement liées à des fractures.

Autre expression du même phénomène, les courbes de fréquences cumulées (figure 25) donnent les résultats suivants : dans le domaine défini sur une largeur de 5 m, de part et d'autre des failles apparaissent :

- 70 % des anomalies du groupe (a) ;
- 45 % des anomalies du groupe (b) ;
- 25 % des anomalies du groupe (c) 80 % .
- 17 % des nœuds normaux des réseaux (d) (1).

(1) Il ne faut pas voir dans ce pourcentage l'influence d'anomalies négligées mais bien plus une conséquence directe de la forte densité de directions tectoniques relevées : les fractures ne donnant pas toutes des anomalies, il est normal qu'un certain pourcentage des nœuds ordinaires apparaisse dans cette bande

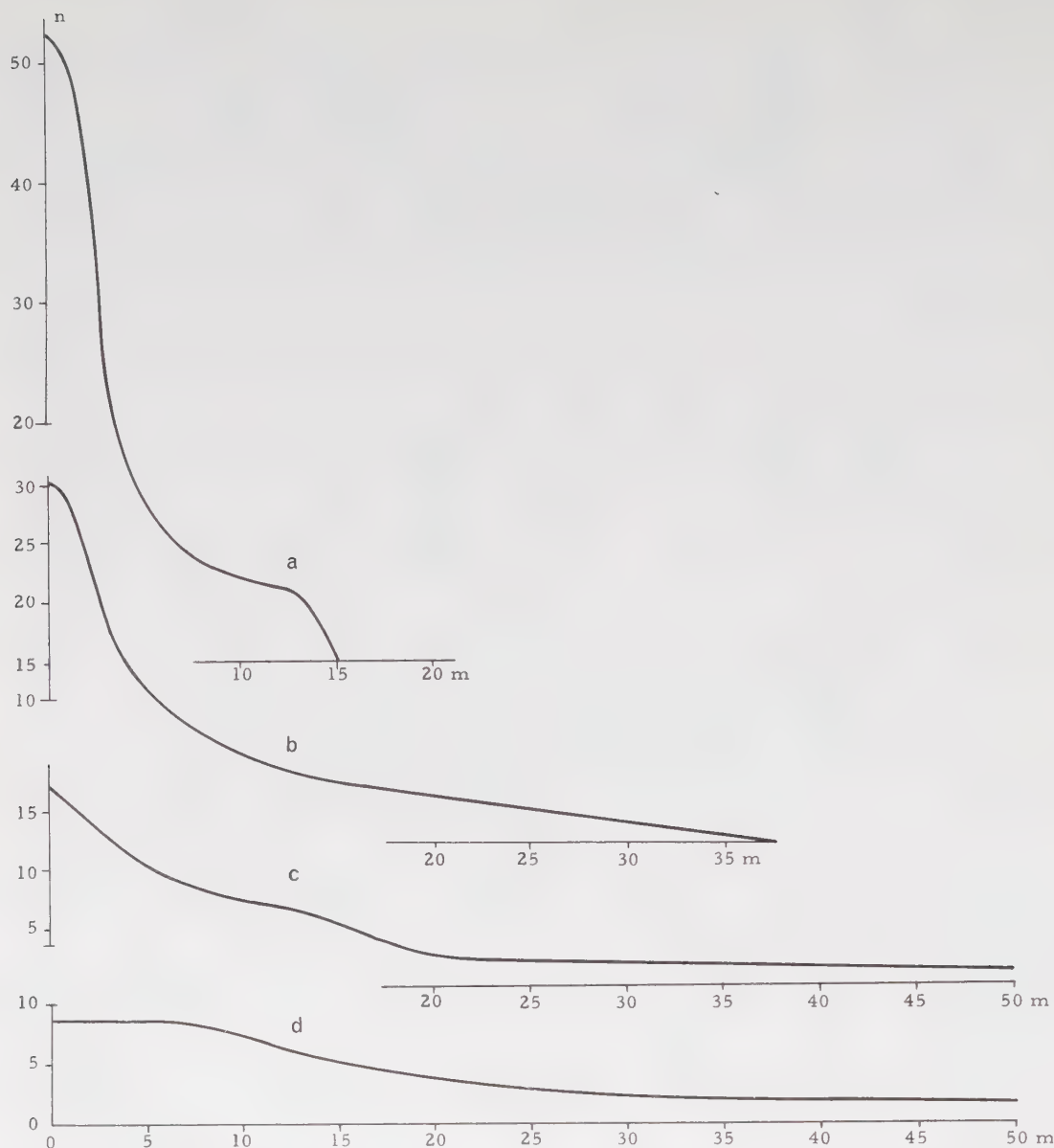


Figure 24 - Courbes de répartition du nombre (n) de mesures de distance entre un prélèvement et la faille la plus proche.
Les groupes (a), (b), (c) et (d) sont représentés. La différence entre les quatre cas montre l'efficacité du tri opéré.

Aucun doute n'est donc possible, les résultats sont nets : la décomposition des courbes de fréquence, la séparation statistique des populations et les considérations sur la migration des anomalies ont permis de caractériser la population (II) qui s'identifie parfaitement à des anomalies de fuite. La démarche suivie peut même être considérée comme une démonstration du phénomène dans le cas particulier étudié.

e) ANOMALIES ET DIRECTIONS DE FRACTURES

Avant d'en arriver aux conclusions pratiques de ce travail, il convient de revenir sur un aspect jusqu'ici négligé par manque d'informations préliminaires : les anomalies de fuite sont-elles indépendantes de l'orientation des accidents auxquels elles sont liées ?

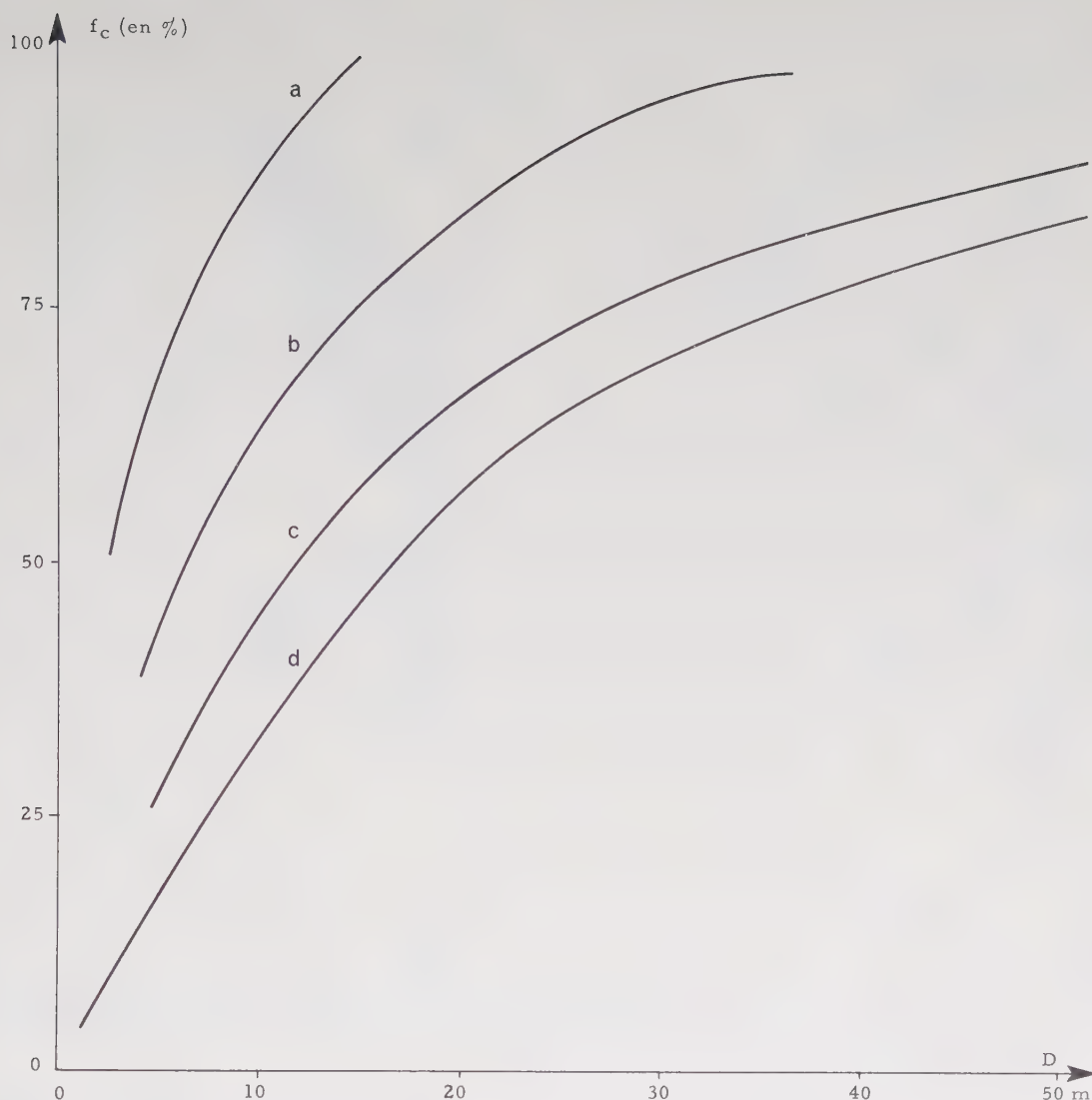


Figure 25 - Courbes de fréquence cumulée (f_c) des distances (D) entre anomalies enracinées et failles.
Les courbes (a), (b), (c) et (d) correspondent aux différents seuils de définition de la figure 24.

A priori, et par simple examen de la carte d'anomalie et de fracture (figure 22), il semble ne pas y avoir de corrélation entre ces deux éléments ; mais il est préférable d'aborder le problème quantitativement et avec une certaine rigueur.

Le simple diagramme liant l'orientation des failles au nombre d'anomalies qui en dérivent (figure 26 A) est, à cet égard, peu significatif. En effet, les différentes traces tectoniques n'ont pas la même importance relative et faussent ainsi le résultat. Pour tourner cette difficulté, un diagramme de fréquence des accidents a été établi (1) (figure 26 B). Quatre secteurs s'individualisent sur la figure 26 A et, pour chacun d'entre eux, le nombre total d'anomalies a été corrigé par la fréquence des orientations tectoniques. On définit ainsi un indice de concentration d'anomalie pour chaque groupe de fracture ; les résultats de cette opération sont les suivants :

- secteur 0 à 37° : indice 6,3 ; - secteur 105 à 135° : indice 10,3 ;
- secteur 37 à 60° : indice 10,8 ; - secteur 150 à 180° : indice 15,4 ;

(1) La carte structurale fait ressortir la longueur très variable des accidents. Pour éliminer cet effet parasite, le diagramme a été établi sur les longueurs relatives de chaque direction.

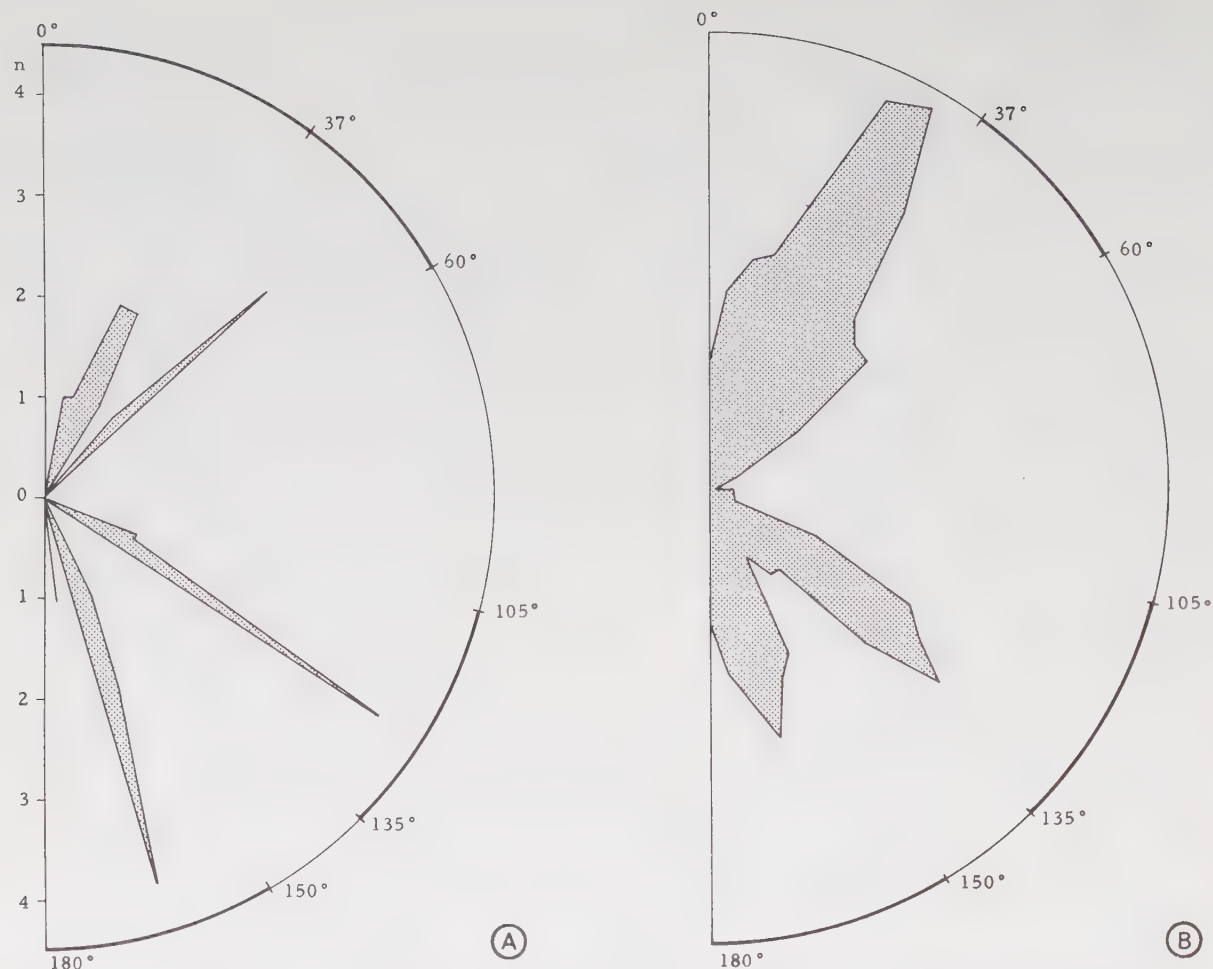


Figure 26 - Diagrammes : A, du nombre d'anomalies (n) en fonction de l'orientation des failles dont elles dérivent ; B, de fréquence des directions tectoniques du périmètre des Estourels. Les diagrammes sont établis par secteurs de 5 degrés.

Les différences entre secteurs sont notables, mais vu le petit nombre d'anomalies considérées dans chaque groupe, elles ne paraissent pas significatives. *On ne peut donc pas dire s'il y a des directions tectoniques réellement privilégiées.* L'orientation du réseau de prélèvement a, pour les mêmes raisons et dans l'état actuel du problème, fort peu d'importance sur le pourcentage de récupération et il n'y a pas lieu de se préoccuper de ce paramètre.

f) COMPLEMENT SUR LA SIGNIFICATION DE L'ANOMALIE DETECTEE

L'existence d'un phénomène de concentration des métaux lourds le long des failles peut être difficilement contestée au vu des résultats précédents. Il est même possible de préciser ces résultats et, par des considérations sur la répartition des anomalies, d'indiquer l'origine des éléments lourds détectés.

La densité d'anomalies s'explique logiquement par l'envolement progressif du Nord-Est vers le Sud-Ouest de la zone anormale du Keuper, c'est-à-dire des 75 m qui surmontent le toit du Muschelkalk. En effet, la répartition du nombre des anomalies sélectionnées précédemment est fonction de la profondeur de ce niveau (sous la surface actuelle d'érosion) et indique trois domaines (figure 27 A) :

- entre 10 et 75 m : le nombre d'anomalies croît rapidement,
- entre 75 et 120 m : le nombre d'anomalies est sensiblement constant,
- au delà : il tend rapidement vers zéro.

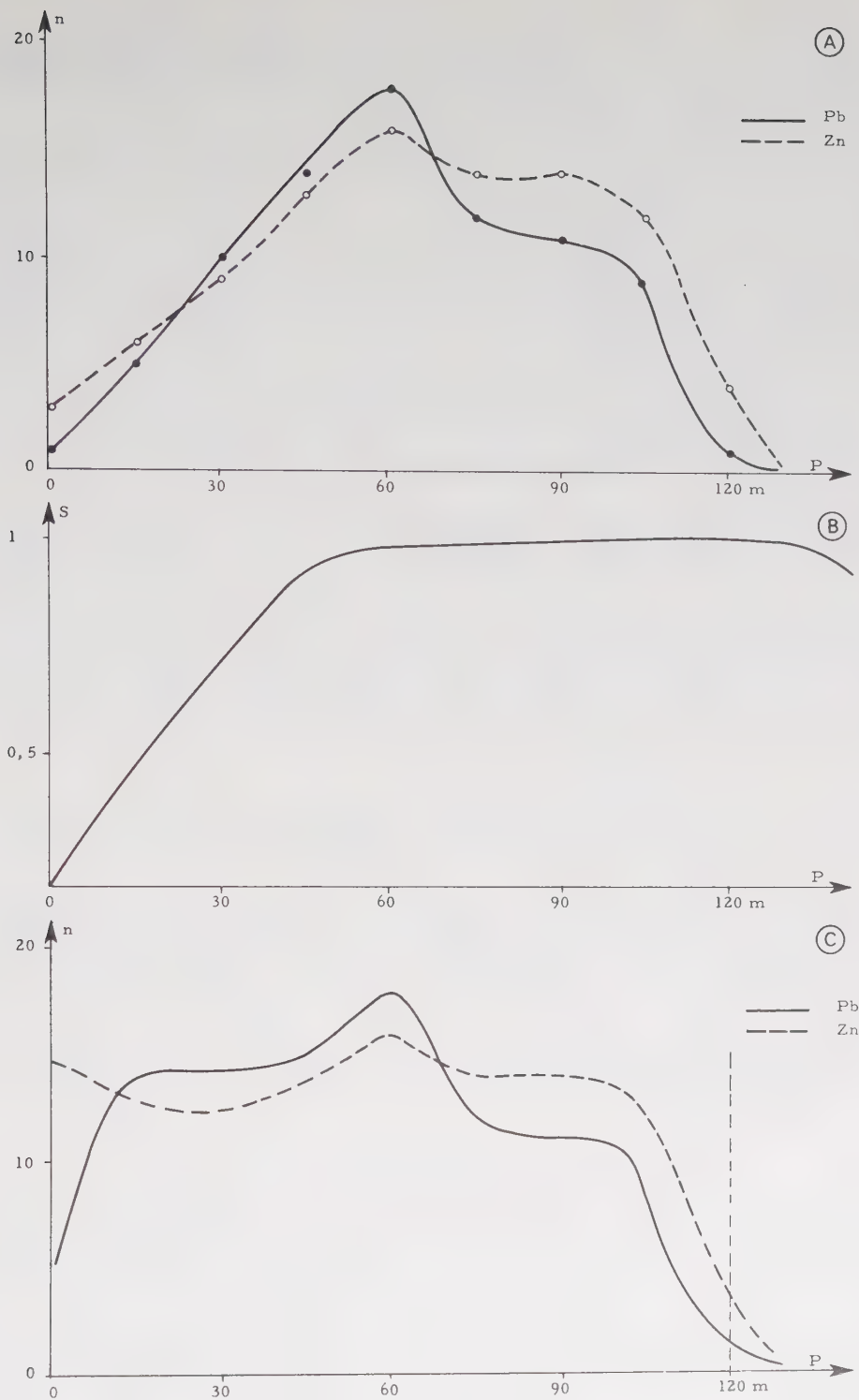


Figure 27 - Distribution des anomalies de fuite en fonction de l'enfouissement du niveau anomal. Le nombre d'anomalies (n) en plomb et en zinc est fonction de la profondeur (P) du toit du Muschelkalk sous la surface topographique (figure A). Mais le phénomène est perturbé par une distribution irrégulière des surfaces d'affleurement (S) du Keuper en fonction de la profondeur du Muschelkalk (figure B). Il est donc nécessaire de corriger la densité apparente d'anomalie, opération qui donne les résultats suivants (figure C) :

- le domaine des anomalies stratiformes du Keuper affectées par les failles (0 à 75 m) ;
- le domaine des anomalies de fuite (75 à 120 m).

Il semble que le domaine d'influence de la minéralisation soit plus étendu pour le zinc que pour le plomb (décalage des courbes) ; la mobilité supérieure du zinc suffit à expliquer cette constatation.

Mais si l'on trace la distribution des surfaces d'affleurement en fonction de la profondeur du Muschelkalk (figure 27 B), on constate que la croissance du nombre d'anomalies entre 10 et 75 m est un simple artefact provoqué par la topographie : le domaine correspondant à la tranche 10-75 m est très mal représenté dans la surface topographique actuelle.

Pour éliminer cet effet parasite, les courbes de densité d'anomalies ont été ramenées à une même surface d'affleurement (figure 27 C).

- de 10 à 75 m : les niveaux anormaux sont toujours très proches de la surface et se traduisent par des anomalies de fuite sans grande signification,

- de 75 à 120 m : les mêmes niveaux s'enfoncent et on constate une densité d'anomalies de fuite d'abord constante puis très rapidement décroissante au delà de 110 m et négligeable à partir de 140 m.

Il apparaît donc une explication logique de la répartition des anomalies de fuite sans faire intervenir l'influence des minéralisations du Buntsandstein. Il est même certain que cette influence est nulle car si les fuites provenaient de cette formation après une migration de 180 m (le Muschelkalk a environ 50 m de puissance), l'influence des anomalies du Keuper (anomalies de même importance que celle du Buntsandstein) devrait se sentir sur une distance comparable (1), ce qui n'est absolument pas le cas.

Toutes les anomalies sélectionnées dérivent donc des minéralisations du Keuper et la deuxième partie des courbes traduit le véritable phénomène de fuite à travers une couverture stérile ; la profondeur d'investigation est limitée à une tranche de terrain de 40 à 50 m au-dessus du niveau minéralisé.

Le phénomène de fuite et son domaine d'influence se trouvent donc précisés conjointement ; les hypothèses initiales apparaissent dès lors entièrement justifiées et, si les phénomènes observés diffèrent quelque peu des phénomènes supposés, l'alternative entre les deux hypothèses exprimées (anomalie de fuite ou anomalie de couche porteuse) trouve toute sa signification : les deux phénomènes existent et leur superposition définit parfaitement la distribution géochimique de surface.

D - APPLICATION DES RÉSULTATS AU PÉRIMÈTRE DU MAS GAUTHIER

La caractéristique première de l'analyse présentée est son manque de généralité. Il ne peut être question d'étendre ici les investigations à des milieux bien différents, mais il a paru intéressant d'extrapoler le principe à la campagne du Mas Gauthier dont la reconnaissance par sondage avait révélé des amas minéralisés dans le Buntsandstein, alors que toutes les autres données géologiques restaient les mêmes.

Il ne s'avère pas nécessaire, dans ce cas particulier, de reprendre le travail à sa base, bien au contraire, la juxtaposition des deux périmètres permet de se servir des premiers résultats pour aborder cette extension du problème.

1 - RÉSULTATS DU MAS GAUTHIER

Le problème est quelque peu compliqué par la présence, à l'Est du périmètre, d'affleurements de l'Hettangien inférieur et moyen, amenés au contact du Keuper par la faille Montréal-Laurac (figure 28).

Il est *a priori* évident que le choix des valeurs anormales effectué précédemment ne peut s'appliquer à des zones d'affleurement d'une roche à teneur basale très différente, et c'est précisément le cas des roches carbonatées de l'Hettangien. Mais si l'on excepte cette zone, peut-on constater une augmentation de la densité en anomalies par rapport à la zone des Estourels ?

Il n'en est rien, et même, bien au contraire, les anomalies se révèlent moins abondantes que dans la zone voisine des Estourels (figure 28) ; il se pourrait simplement - ainsi qu'il ressort des sondages effectués dans cette zone - que le niveau anomal soit ici trop profond pour être détecté

(1) Les migrations possibles des minéralisations du Buntsandstein et du Keuper sont difficiles à comparer, car si le Keuper est peut-être moins favorable, car très argileux, l'écran que constitue le Muschelkalk essentiellement marneux rend les migrations profondes aussi difficiles. Tout compte fait, les deux domaines d'influence doivent être du même ordre de grandeur.

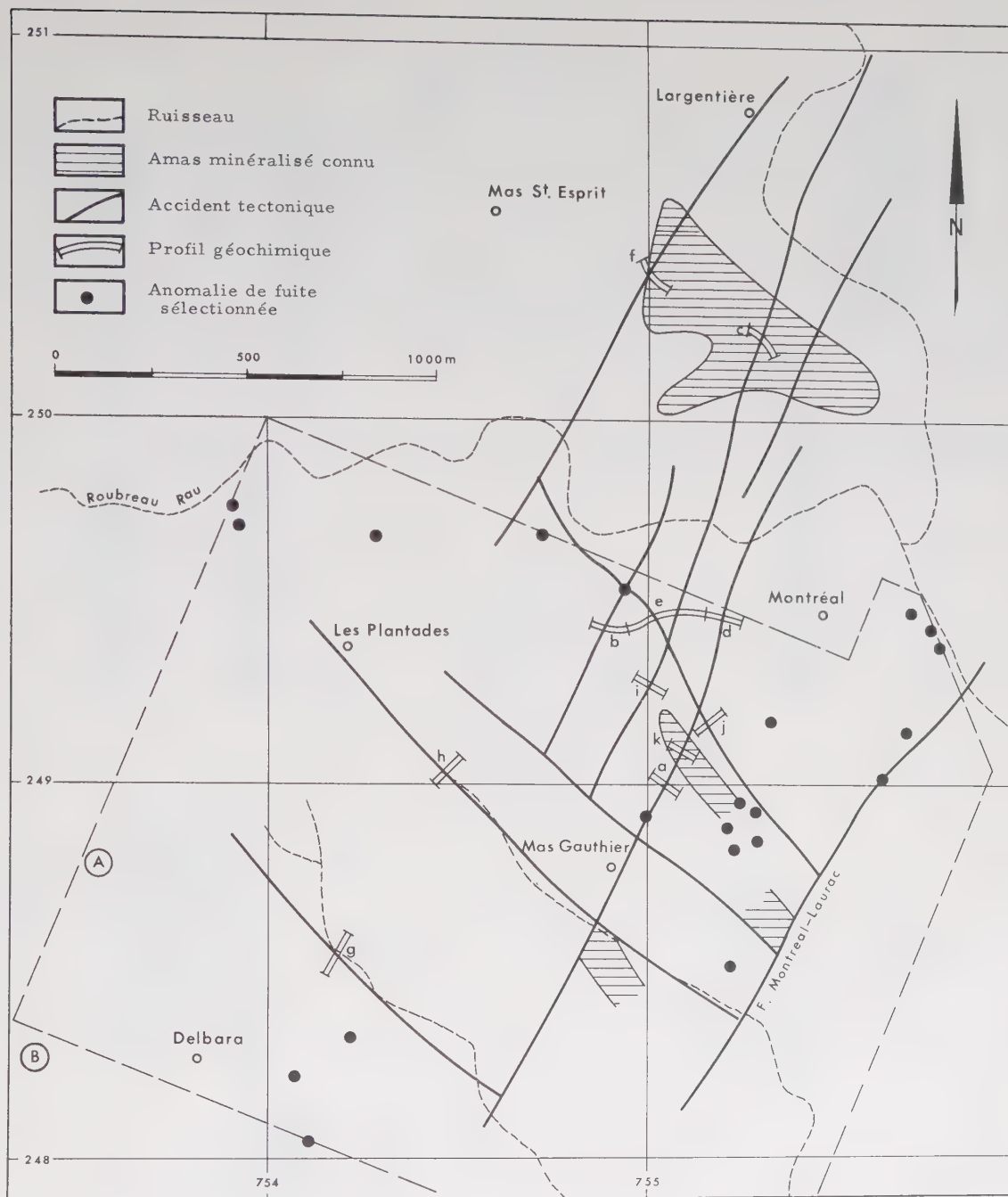


Figure 28 - Schéma cartographique de la campagne du Mas Gauthier.

A : périmètre du Mas Gauthier - B/ périmètre des Estourels. Les profils : a, b, c... sont représentés par la figure 29.

Malgré une certaine concentration d'anomalies de fuite à l'aplomb du prolongement probable d'un des amas, il n'apparaît aucune corrélation satisfaisante entre les amas et les anomalies. Les anomalies situées au Sud-Est de la faille Laurac-Montréal, c'est-à-dire dans l'Hettangien, ne sont pas représentées sur cette carte : le travail de sélection ne peut s'appliquer à un terrain dont on ignore la répartition des teneurs ; un travail comparable à celui effectué pour le Keuper serait nécessaire.

en surface. D'autre part, la présence de minéralisation dans le Buntsandstein ne se traduit par aucun phénomène de surface qui puisse permettre une recherche des amas encore inconnus (figure 28).

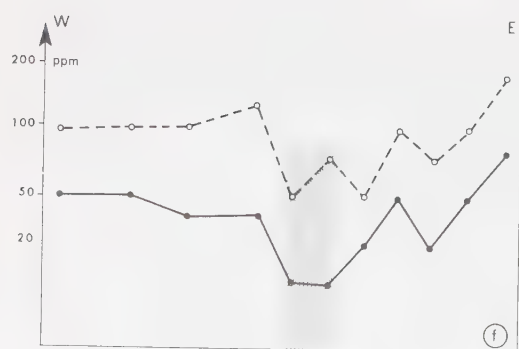
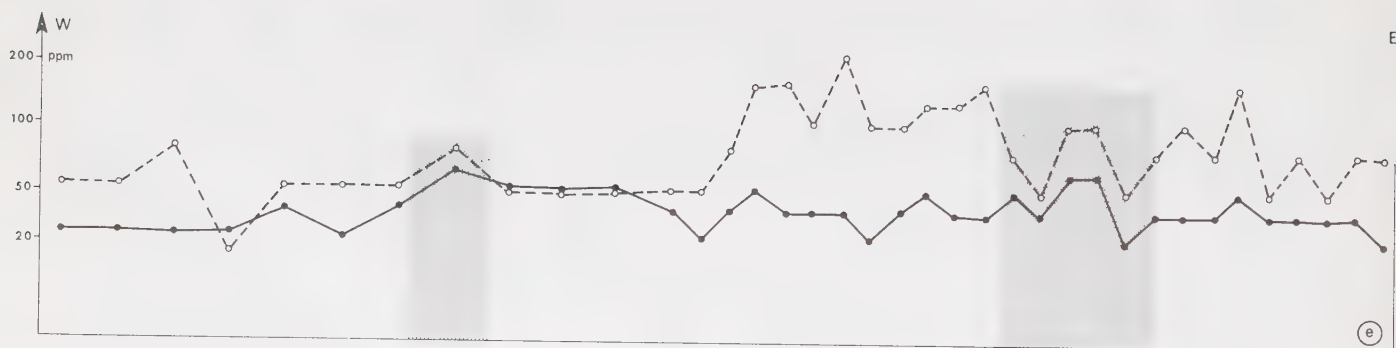
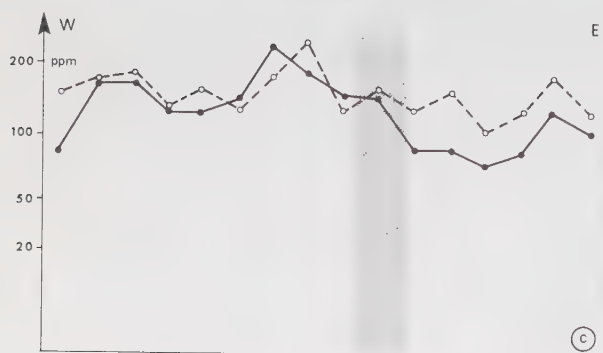
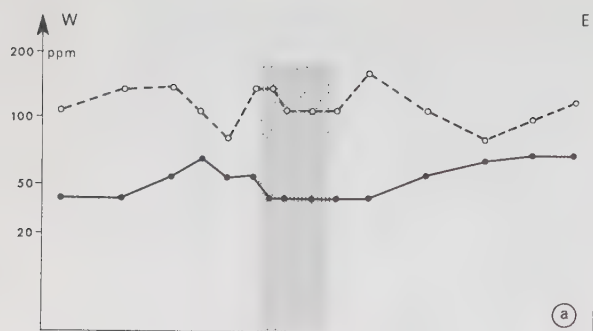


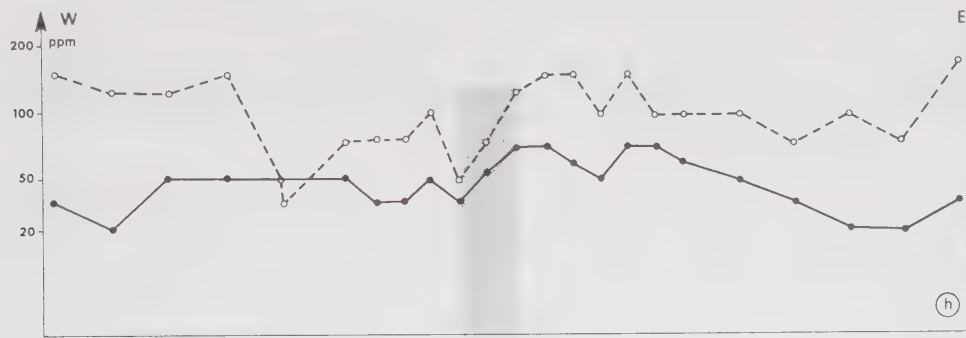
Figure 29 - Profils géochimiques à maille serrée perpendiculaire à des failles (*ci-dessus et ci-contre*). Les emplacements des profils sont figurés sur la carte 28. Les teneurs en plomb (trait plein) et en zinc (trait pointillé) sont diversement affectées par le passage des failles (en grisé) repérées au sol.

2 - VERIFICATIONS DIRECTES

Jusqu'ici les investigations ont été conduites à partir des résultats globaux qui se sont prêtés à une analyse détaillée des phénomènes élémentaires. Mais ne peut-on chercher à cerner directement les variations de teneur à proximité des accidents tectoniques ?

Un échantillonnage serré a été réalisé transversalement à un certain nombre d'accidents de direction et d'importance variées qui affectent toujours uniquement le Keuper (figure 28). Le choix de ces accidents a été déterminé aussi bien par des conditions géologiques (position par rapport à des lentilles minéralisées) que par des conditions superficielles (reconnaissance et localisation précises des accidents en surface). La maille des prélèvements en sol s'échelonne entre 2 et 8 m suivant la position de l'échantillon par rapport à la faille : plus serrée à proximité, elle s'agrandit loin des accidents (cette dernière précaution était prise pour assurer une certaine précision au profil de l'anomalie éventuelle).

Les résultats (figure 29) montrent que, loin de présenter des enrichissements nets, les sols sont généralement à teneur plus faible (profils b, d, e, f, h, j) à l'aplomb des failles, ils restent



0 10 20 m

parfois sans variations notables (profils a, c, d, i, k) et présentent un enrichissement net pour le seul profil g.

Que peut-on conclure de ces résultats directs ? Tout d'abord, il ne fallait pas s'attendre à ce que les failles présentent des anomalies sur toute la longueur de traversée des corps minéralisés enfouis, comme l'avaient fait remarquer M. Aubague *et al* (1964) ; mais fait plus grave, aucun des profils situés à l'aplomb des amas (1) ne comporte d'anomalie, et même la seule anomalie caractéristique semble en dehors des zones minéralisées.

Il est difficile, au vu de ces résultats d'être catégorique, mais on peut en conclure que les phénomènes géochimiques observés en surface ne semblent pas liés à des minéralisations du Buntsandstein. On retrouve donc ainsi les résultats déduits de l'étude des cartes de teneurs.

La tentative de prospection d'amas du Buntsandstein ardéchois par les anomalies de fuite s'avère donc, en définitive, être un échec. La cause de cet insuccès est double : limite trop faible d'investigations en profondeur et présence de couches porteuses sus-jacentes.

E - RETOUR SUR LE PROBLÈME DE LA MAILLE

Les résultats obtenus démontrent clairement l'impossibilité de détection de gîtes du Buntsandstein par "fuite" à travers le Keuper dans ce cas particulier d'enfouissement et d'environnement géochimique. Il ne faut cependant condamner la méthode pour autant mais plutôt préciser les modalités d'application en milieu favorable.

En particulier, domaine essentiel mais souvent trop livré au bon sens et à l'empirisme, le choix de la maille peut être discuté. En effet, poste important du prix de revient d'une campagne de prospection tactique, la densité de prélèvement est fonction du type de problème et aucune solution absolue n'est possible.

Que recherche-t-on par l'échantillonnage ? La mise en évidence de la quasi-totalité des anomalies existantes ou celle de domaines présentant une forte densité d'anomalies ? Tel est le premier problème qui se pose. En effet, la prospection tactique d'anomalies liées à des gisements filoniens nécessite la mise en évidence de la grande majorité, voire la totalité, des anomalies -au demeurant peu nombreuses- car chacune d'entre elles est susceptible d'indiquer un indice important. Le pourcentage des anomalies échantillonnées étant fonction de la maille employée, le problème s'avère avant tout un problème économique : le compromis entre le prix de revient et celui de l'efficacité maximum conditionne le choix du paramètre "maille".

Tout autre cependant est l'optique suivant laquelle doit être envisagée une prospection tactique par anomalie de fuite. En effet, la multiplicité des fractures affectant un amas stratiforme et son auréole géochimique assure une migration importante et se traduit par de nombreuses anomalies. La détection de toutes les anomalies est sans intérêt : seul le domaine où elles se répartissent, donc leur enveloppe approximative, définit une zone favorable. Dans ces conditions, la connaissance de la densité réelle d'anomalie et celle de la géométrie des domaines anomaux permettent de définir une maille minimum qui est fonction du pourcentage de récupération estimé nécessaire.

Plus exactement et dans un cas tout à fait général, le problème de la reconnaissance d'une anomalie est double comme le fait remarquer F.F. Langford (1965). Pour cet auteur, la mise en évidence d'une anomalie nécessite : - que cette anomalie soit échantillonnée ; - que ce prélèvement soit reconnu comme anormal.

Autrement dit, le pourcentage d'anomalies "récupérées" P est le produit d'un coefficient d'échantillonnage P_1 et d'un coefficient d'identification P_2 .

1 - ECHANTILLONNAGE

La géométrie des anomalies mises en évidence est mal précisée et variable suivant le métal de référence. Toutefois à partir des données sur les profils et de l'examen des cartes d'anomalies,

(1) Les tracés approximatifs des contours correspondent à des accumulations minimums de 5 % métal sur 1 m : une auréole à plus basse teneur entoure ces amas et élargit le problème de détection.

on peut admettre, dans le cas du plomb, un modèle allongé, de 10 m de largeur et vraisemblablement de 20 m de longueur ; pour simplifier le problème et en étant optimiste, on peut assimiler ce modèle à un rectangle de 20 x 10 m (1). Dans ce cas, la surface de l'anomalie est très petite par rapport à la surface de la maille et la probabilité de détection d'une telle anomalie est le rapport des deux aires, soit :

$$P_1 = \frac{\text{Surface anomalie}}{\text{Surface maille}} = \frac{20 \times 10}{50 \times 50} = 0,08$$

Ceci n'est vrai, en toute rigueur, que pour les anomalies circulaires ce qui n'est évidemment pas le cas ici, mais l'orientation quelconque des anomalies par rapport au réseau permet de négliger le facteur de forme de l'anomalie (2).

2 - IDENTIFICATION

La distinction entre une valeur normale et une valeur anormale est très souvent empirique et guidée par l'expérience locale. Dans le cas particulier du Keuper ardéchois, les anomalies retenues sont limitées dans le domaine des faibles valeurs par le fond géochimique régional et dans le domaine des fortes valeurs par les anomalies "stratiformes". Les décompositions des courbes de fréquence ont montré que seule une fraction du nombre total d'anomalies pouvait être retenu.

La connaissance de la loi de distribution d'un des phénomènes et des coupures imposées par sa discrimination permet de calculer le pourcentage de "récupération". Dans le cas étudié, le calcul effectué pour le seuil de 99 % donne les résultats suivants :

$$\text{- plomb : } P_2 = 0,26 \text{ ; - zinc : } P_2 = 0,69$$

Le coefficient d'identification P_2 est donc, dans le cas étudié, bien plus élevé que celui d'échantillonnage P_1 . Vouloir augmenter la qualification de l'anomalie revient à resserrer le domaine des teneurs choisies, donc à diminuer le coefficient P_2 , mais dans une assez faible mesure. Dans le type de prospection envisagée, il y aura donc toujours le plus grand intérêt à assurer au maximum la qualification de l'anomalie, même au détriment d'une légère baisse de la récupération des anomalies.

Le pourcentage d'anomalies récupérées ($P = P_1 \times P_2$) se réduit donc à environ 2 % pour le plomb et 6 % pour le zinc, ce qui paraît faible mais sans contradiction aucune avec les impératifs d'une prospection géochimique tactique par anomalies de fuite : la faible récupération est compensée par le grand nombre d'anomalies existantes.

Mais peut-on encore réduire ces pourcentages par agrandissement de la maille ?

C'est à ce stade que l'empirisme apparaît car la question se réduit en fait à la suivante : quelle est la densité d'anomalies qui paraîtra caractéristique à l'interprétateur ? Il ne peut en effet être question d'orienter des investigations directes sur la foi d'une seule anomalie alors qu'une zone où apparaissent 20 ou 30 anomalies, retiendra très certainement l'attention. Entre ces deux extrêmes, il n'y a que l'expérience qui laissera la possibilité de fixer la densité critique d'anomalie au delà de laquelle les indications seront retenues.

L'examen des cartes d'anomalies en plomb et zinc des périmètres étudiés révèle une densité surabondante d'anomalies sélectionnées. Dans ce cas particulier une augmentation des dimensions de la maille de 50 % diviserait le nombre d'anomalies par 2,25 et serait encore acceptable.

Il ne faut cependant pas vouloir aller trop loin dans ce type de raisonnement car d'une part

(1) Les données précises manquent sur la forme et la dimension moyenne des anomalies : *a priori* allongées le long de la faille, elles sont cependant assez discontinues ainsi qu'il ressort de l'examen de la figure 22.

La largeur du pic, pour des valeurs situées dans l'intervalle de discrimination est faible. Elle est inférieure à 10 m dans le cas du profil g (figure 29) et elle semble encore plus faible d'après les données de la figure 24 : la probabilité de trouver une anomalie à plus de 15 m est en effet nulle et 70 % des prélèvements anomaux sont à moins de 5 m d'une fracture. Compte tenu de l'effet de dispersion due aux erreurs multiples (repérage et rapport, détermination et tracé des accidents, lectures) il semble bien que les anomalies ne s'étendent pas au delà de 5 m des failles ; leur largeur n'excéderait donc pas 10 m.

(2) Il faut en plus admettre que les anomalies, donc les fractures sont réparties sans périodicité, ce qui est *a priori* faux, mais ce facteur, peu apparent au demeurant, ne doit pas jouer un rôle bien important dans cette évaluation grossière du pourcentage de récupération.

le cas étudié ne conduit pas à des conclusions positives et d'autre part, chaque type de prospection est un cas d'espèce dont les données sont précisées par des investigations de détails particulières.

Et, à ce titre, les reconnaissances de détail par profils très serrés situés dans des cas géologiques particuliers et bien définis, doivent renseigner efficacement. Mais, si le prélèvement à maille régulière peut être exécuté par un personnel peu qualifié et reste donc, par là même, peu coûteux, par contre, le profil à maille serrée, implanté sur les failles, nécessite un repérage toujours très délicat des accidents sur le terrain et impose la présence d'un géologue dans l'équipe de prélèvement. Cette démarche méticuleuse s'oppose à un travail systématique bien organisé et à une recherche du rendement : le prix de revient devient prohibitif et il ne peut être question de généraliser ce procédé et de mener toute une campagne sur ces bases.

Il faut donc en arriver à une solution de compromis entre les deux attitudes et distinguer :

- une phase préliminaire où l'établissement de profils renseignera utilement sur la géométrie des anomalies et sur leur densité,
- une phase systématique où le rendement sera possible grâce à l'adoption d'une maille optimum définie d'après les résultats de la phase précédente.

F - CONCLUSION

Quels sont donc les résultats qui se dégagent de cette étude ? L'idée initiale de mettre en évidence un gisement stratiforme aveugle par migration de métaux lourds dans les failles s'est trouvée justifiée *a posteriori* par la démonstration de la réalité du phénomène escompté dans le cas précis étudié.

Ce résultat a été obtenu à partir de l'étude de la distribution globale des résultats d'analyses d'une population de 2750 échantillons : cette population traduit la somme de 3 phénomènes élémentaires dont l'un est lié d'une façon indiscutable à l'existence et à la proximité de fractures.

Les hypothèses nécessaires à l'établissement de ce résultat se sont confirmées (attribution des populations élémentaires à un phénomène particulier) excepté pour ce qui est du type de distribution : les lois log-normales et les décompositions qu'elles ont permis de réaliser sans ambiguïté ne représentent fidèlement les populations qu'au voisinage des maximums. Aurait-on pu se contenter d'établir des coupures empiriques au vu des courbes lissées (figure 15) et de négliger le reste des opérations ? Le domaine de discrimination de la population (II) aurait pu se prévoir intuitivement mais sans aucune idée, même approximative des pollutions concédées.

Les hypothèses mathématiques étaient cependant nécessaires à l'individualisation des phénomènes ; l'imprécision du modèle s'est révélée très peu gênante dans la conduite des calculs et l'interprétation des résultats.

Il aurait pu paraître judicieux de mener parallèlement aux investigations sur la localisation de la population (II), un essai d'individualisation statistique puis géologique de la population (III) attribuée aux affleurements d'un niveau porteur du Keuper. Statistiquement, le problème est simple et a été réalisé sous forme d'une courbe comparable à celles de la figure 20. Mais le report des résultats sur fond topographique a fourni des ensembles de points dont l'interprétation s'est heurtée à la mauvaise connaissance de détail de la structure locale : les exemples de corrélation géochimie - géologie autres que ceux décrits dans la figure 16 sont trop rares pour permettre une généralisation de la méthode. De plus, l'individualisation du phénomène (III) conduisait à ne retenir qu'une fraction de la population correspondante et avec aussi peu de données, une cartographie géochimique du niveau porteur devenait impossible.

Pratiquement, le phénomène recherché existe donc, mais, dans le cas particulier étudié, son influence est limitée à une couverture de terrain inférieure à 60 m ; ce n'est donc pas l'outil rêvé pour des détectations profondes. De plus, l'existence quasi-générale de récurrences géochimiques au-dessus des gisements stratiformes perturbe considérablement la reconnaissance d'amas plus profonds et même, il est à prévoir que dans la majorité des cas ces niveaux porteurs sus-jacents se comporteront comme de véritables écrans en-dessous desquels aucune investigation ne sera possible.

Il est possible d'aborder ainsi le problème des migrations épigénétiques des minerais : les minéralisations de Largentière apparaissent localement reconcentrées le long des fractures et

semblent alors, d'après l'observation directe, postérieures au dernier rejeu des accidents. Par analogie avec l'exemple étudié, ces migrations seraient donc récentes (postérieures au Pliocène inférieur) et superficielles (inférieures à 3 ou 400 m) ainsi que l'indiquent quelques témoins des zones d'altération antérieures aux grands effondrements. Cet abord indirect d'un problème métallogénique primordial s'avère fructueux et doit permettre des développements importants.

Troisième Partie

CONCLUSION

La recherche des gîtes stratiformes non affleurants demeure une opération des plus délicates encore que disposant d'un arsenal bien fourni de techniques de prospection. D'un côté, les sondages qui paraissent "aveugles" face aux amas de minerai qu'ils doivent toucher pour les saisir, de l'autre, l'ensemble des méthodes géologiques, géochimiques et géophysiques qui peuvent prévoir, peut-être même "voir" mais jamais démontrer l'importance de la concentration minérale et ressemblent ainsi au paralytique de la fable : son efficacité provient de son association à l'aveugle, le sondage, qui de son côté s'avère tout aussi impuissant est inefficace dans son isolement.

L'image, pour simpliste qu'elle soit, a sa valeur : aucune technique ne peut, seule, résoudre un problème aussi complexe que celui de la prospection des amas enfouis ; aucune méthode isolée n'a valeur de panacée. En fait, il est impossible d'attribuer une quotation d'efficacité à une méthode donnée. La fréquence d'utilisation pourrait peut-être être employée dans ce but, mais là encore, la vogue du moment ne sera-t-elle pas le facteur dominant qui ressortira d'un tel essai ?

La sélection judicieuse des outils de recherche ne relève d'aucun principe universel et pour cette raison, la prospection est, à juste titre, considérée comme un art. Mais notre civilisation technocratique s'accommode mal d'une telle situation et cherche à codifier les principes du choix, peut-être même à en laisser un jour la responsabilité à un calculateur électronique. Mais qui alors codifiera et établira les données du problème ?

Sans vouloir aller dès maintenant jusqu'à ce stade d'organisation pour lequel la définition même des problèmes de prospection est loin d'avoir acquis la maturité nécessaire, il paraît toutefois utile de replacer les deux études qui viennent d'être présentées dans leur contexte véritable, l'organisation, "l'architecture" dirait J. Fortescue (1965), de la prospection minière.

La gravimétrie aussi bien que la géochimie tactique de fuite apparaissent comme des moyens d'approche spécifiques au stade de reconnaissance (au sens de F. Blondel, 1950). Leur application au cas du Trias ardéchois a donné des résultats de médiocre qualité : on peut, on doit, se demander pourquoi.

La gravimétrie, telle qu'elle a été employée n'a aucune efficacité et ne peut prétendre résoudre les problèmes posés. La très large prépondérance des erreurs de correction sur la valeur de l'anomalie résiduelle recherchée en est la cause essentielle. Il n'y aura donc possibilité d'emploi que si l'anomalie résiduelle atteint un niveau suffisant et si l'importance des erreurs diminue, c'est-à-dire dans les cas suivants :

- Reliefs peu accusés et corrections très soignées,
- Anomalies réelles beaucoup plus intenses, c'est-à-dire, cas où les contrastes de densité sont très marqués.

Les résultats enregistrés permettent de définir un autre impératif préliminaire à l'emploi de la méthode : il s'agit de l'absence ou de la rareté des anomalies gravimétriques en rapport avec l'objet recherché. Ainsi, à Largentière, l'examen de la répartition des anomalies a conduit à attribuer aux hétérogénéités du socle la majeure partie des anomalies qui se révélaient ainsi sans intérêt pour la prospection. Une campagne gravimétrique préliminaire sur le socle aurait renseigné efficacement sur cet aspect fondamental du problème : la campagne de prospection ne sera efficace que si les anomalies du socle n'atteignent pas un niveau suffisant pour dominer les éventuelles anomalies de couverture liées à des structures favorables à la présence d'un gisement.

C'est à la condition expresse que ces trois points préliminaires se trouvent explicités qu'une utilisation rationnelle de la gravimétrie peut être envisagée pour le type de problème étudié.

La géochimie de fuite sur laquelle de grands espoirs avaient été fondés demeure, au terme de cette étude, une méthode possible mais d'un emploi limité et toujours délicat. Là aussi, il convient de définir quelques impératifs préliminaires à tout emploi rationnel :

- le modèle de l'objet recherché (volume, profondeur, contraste géochimique...);
- la répartition générale des métaux lourds dans la série sédimentaire ;
- les limites locales de la méthode.

Lorsque ces trois aspects du problème se trouvent favorablement précisés, la prospection des gisements stratiformes enfouis par géochimie de fuite devient possible.

Non seulement ces méthodes sont "paralytiques" dans la recherche du minerai, mais elles sont encore "aveugles" si on ne leur définit pas avec un maximum de précision l'objet qu'elles doivent "voir". Pour établir le filtre qu'il faut leur présenter et diminuer ainsi leurs aberrations, une image précise des conditions de travail s'impose. C'est ici que s'articule le deuxième aspect fondamental de la prospection, la technique "perçante", le sondage. Bien qu'"aveugle" dans la recherche directe, il s'avère particulièrement efficace dans la définition du problème sous la forme de sondages de reconnaissance implantés dans le même esprit que les "wild cats" des géologues pétroliers. Sur ces sondages entièrement carottés, plusieurs opérations sont nécessaires :

- Etude pétrographique et sédimentologique approfondie des formations rencontrées ;
- Etablissement d'un profil géochimique à maille serrée (en moyenne 0,5 à l'échantillon au mètre) ;
- Mesure systématique des densités (0,5 échantillon au mètre) ;
- Mesures physiques dans les sondages et en particulier : résistivité, polarisation spontanée et radioactivité.

Le but recherché par ces différentes opérations est double :

- Précision des modalités d'emploi de la gravimétrie, de la géochimie de fuite ou de tout autre méthode ;
- Etablissement d'une échelle lithostratigraphique aussi précise et détaillée que possible.

Cette dernière opération ne présume pas des travaux complémentaires et permet, de toute façon, une exploitation maximum des informations disponibles.

Ainsi se trouvent précisés conjointement le cadre géologique de travail et les données qui régissent le choix des outils de prospection. Parallèlement, tout travail régional ultérieur pourra alors efficacement tenir compte de ces données initiales et les comparaisons avec les sondages préliminaires de référence porteront tous leurs fruits.

La détermination de la densité optimum d'implantation des sondages de reconnaissance ne relève pas de lois générales : les caractéristiques géologiques régionales influent au plus haut point sur cette grandeur et ce n'est que progressivement, au cours de la reconnaissance que peut se définir la maille idéale. En ce qui concerne la couverture sédimentaire ardéchoise du Massif-Central, il semble que la réalisation d'un sondage par unité de 20 km² de surface à reconnaître corresponde à la densité idéale pour ce type de problème : trop serrés, ces sondages précisent bien entendu le problème mais la dépense exagérée se fait au détriment de la campagne de prospection qui doit logiquement suivre, alors que trop lâches, ils ne peuvent remplir leur rôle et diriger efficacement les travaux ultérieurs.

Le lien le plus étroit, aussi bien entre les différentes techniques de recherche, qu'entre les différents gisements demeure bien évidemment l'analyse géologique. En fait, il n'y a pas de problème de prospection, il n'y a d'un côté que des problèmes de données géologiques, et de l'autre que des mises au point de méthodes d'analyse ou de matériel. Ce dernier aspect relève bien plus de la physique et de la chimie et demeure totalement hors du sujet. Toute prospection se heurte donc avant tout aux difficultés de la connaissance géologique : le choix des méthodes et leurs applications à des situations concrètes viennent toujours buter, parfois même échouer, sur cet obstacle. C'est donc essentiellement sur cet aspect que doit s'appliquer l'effort maximum, et dès lors, sur des faits bien établis, les techniques indirectes trouvent un maximum d'efficacité.

Ce qui est vrai à l'échelle du travail ici présenté, au stade de la reconnaissance, est aussi bien confirmé par les autres phases des investigations minières. De même que la reconnaissance, l'exploration et la prospection supposent acquises des données géologiques solides sur lesquelles peut

s'appuyer l'arsenal existant des techniques. Mais plus draconiennes encore paraissent les exigences qui se font jour lors du passage d'une étape à une autre étape, plus détaillée : la mauvaise compréhension de ce passage d'échelle à échelle conduit à des interprétations erronées, à des choix dangereux, et de là, à l'échec total.

De la décision initiale de prospection jusqu'à la fin de l'exploitation minière, la nécessité des études géologiques approfondies demeure la même : que ce soit dans le choix des périmètres d'investigation ou dans la conduite des travaux de prospection qu'elle qu'en soit l'échelle, ou encore dans la reconnaissance préliminaire, à grande échelle, du minerai, seule la connaissance géologique est à même de guider, quant à la décision d'emploi des autres outils de détection,

BIBLIOGRAPHIE

- AHRENS L.H. (1954 a). - Log-normal distribution of the elements (1). *Geochim. et Cosmochim. Acta*, vol. 5, pp. 49-73.
- AHRENS L.H. (1954 b). - Log-normal distribution of the elements (2). *Geochim. et Cosmochim. Acta*, vol. 6, pp. 121-131.
- ALAIS A. (1956). - Méthode d'évaluation des perspectives économiques de la recherche minière sur de grands espaces. Application au Sahara algérien. *Comm. Congr. Cent. Indust. minér., Rev. Indust. minér.*, Saint-Etienne, n° sp. IR., pp. 329-382.
- ALAJOUANINE Y. et JAEGER J. (1961). - Prospection gravimétrique aux environs de Largentière (Ardèche). *Rapport B.R.G.M.* inédit.
- ANDERSON D.H., and HAWKES H.E. (1958). - Relative mobility of the common elements in weathering of some schist and granite areas. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, vol. 14, pp. 204-210.
- AUBAGUE M., FOGLIERINI F. et GRANIER C. (1964). - Sur les anomalies de fuite en prospection géochimique stratégique. Un exemple pris dans la bordure sédimentaire du Vivarais. *Bull. Soc. fr. Minéral.*, Paris, t. LXXXVIII, n° 1, pp. 20-27.
- AUBERT G. und LOUGNON J. (1963). - Ein konkretes Beispiel für das Aufsuchen und die Entdeckung einer verdeckten schichten förmigen Vererzung: Villefagnan. *Freiberger Forschungshefte*, Leipzig, C163, pp. 93-96.
- AUBERT M. (1964). - Intégrateur optique pour l'interprétation gravimétrique et magnétique. *C.R. Acad. Sci.*, Paris, vol. 259, n° 3, pp. 615-617.
- AUBERT M. (1965). - Interprétation des cartes gravimétriques ou magnétiques par intégrateur analogique de flux lumineux. Thèse, Paris, 1965, 65 p. 42 fig. bibl.
- BERNARD A. (1962). - Notions de métallogénie sédimentaire. in Coll. gîtes stratiformes, *Notes et Mém. Serv. géol. Maroc*, n° 181, pp. 267-282, 4 fig., bibl.
- BERNARD A. et SAMAMA J.-C. (1964). - Rapport sur les activités réalisées sur la bordure sous-cévenole entre le 1er juillet 1963 et le 31 décembre 1964. *Rapport inédit*, Fonds de Développement de la Recherche Scientifique et Technique.
- BLONDEL F. (1934). - La répartition mondiale des gisements de zinc et de plomb. *Bull. Soc. géol. Fr.*, Paris, 1934, 5e série, t. IV, pp. 213-224.
- BLONDEL F. (1942). - La recherche scientifique des gisements minéraux. Paris, *Publ. Bur. Et. géol. min.*, ed., n° 18.
- BLONDEL F. (1950). - La recherche minière. *Ann. Mines*, Paris, fasc. 1, pp. 17-33.
- BLONDEL F. (1951). - La répartition géographique des gisements minéraux. *Chron. Mines Coloniales*, n° 175, pp. 2-8.
- BLONDEL F. (1956). - Les lois statistiques de la répartition géographique des productions minières. *Comm. Congr. Cent. Indust. minér., Rev. Indust. minér.*, St-Etienne, 1956, n° sp. IR., pp. 319-328.
- BLONDEL F. et VENTURA E. (1956). - Structure de la distribution des produits minéraux dans le monde. *Ann. Mines*, Paris, pp. 6-91.
- CHAYES F. (1954). - The log-normal distribution of the elements (a discussion). *Geochim. et Cosmochim. Acta*, vol. 6, pp. 119-120.
- CLARKE F.W. (1924). - The data of geochemistry. *US Geol. Surv. Bull.*, n° 770, 1 vol. 841 p.
- COLETTE B.J. (1965). - Charts for determining the gravity effect of two and three dimensional bodies bounded by arbitrary polygons. *Geophy. Prospect.*, vol. XIII, n° 1, pp. 12-21.

- COOPER J.R. and HUFF L.C. (1951). - Geological investigations and geochemical prospecting experiment at Johnson, Arizona, *Econ. Geol.*, Urbana, vol. 46, pp. 731-756.
- DELTHEIL R. et HURON R. (1959). - Statistique mathématique. *Coll. Armand Colin*, Paris, n° 336, 208 p.
- DREIMANIS A. (1960). - Geochemical prospecting for Cu, Pb, and Zn in glaciated areas, eastern Canada. *Int. Geol. Congr., XXI Session*, Pt. II, pp. 7-19.
- ELMI S. (1964). - Le Domérien de la région d'Aubenas (Ardèche). *89e Congr. Soc. savantes*, Lyon, pp. 63-71, 3 fig.
- ELMI S. et MOUTERDE R. (1965). - Le Lias inférieur et moyen entre Aubenas et Privas (Ardèche). *Trav. Lab. Géol. Lyon*, n° sp. 12, pp. 143-245, 31 fig. 6 tabl.
- ERGIN K. (1952). - Gravity and magnetometer surveys for chromite ore deposits in Turkey. *Congr. géol. Int. Algèr*, fasc. IX, section IX, pp. 121-130.
- FABRE G. (1893). - Stratigraphie des petites Causses entre Gévaudan et Vivarais. *Bull. Soc. géol. Fr.*, Paris, 3e sér., n° 21, pp. 640-674.
- FATT I. (1958). - Compressibility of sandstone at low to moderate pressures. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, Tulsa, vol. 42, n° 8, pp. 1924-1957, 18 fig.
- FAYTEL'SON A. Sh. (1965). - Classification génétique des structures tectoniques de plateforme et des paléostrutures d'après les données géophysiques sur la structure cassante du socle. *Sovetskaya Geologiya*, n° 1, pp. 76-94, Leningrad (en Russe).
- FERRIS C. (1964 a). - Gravimetrics are key to Ohio's Trempealean. *Oil and Gas Journ.*, vol. 62, n° 47, pp. 148-151.
- FERRIS C. (1964 b). - Look for more reefs in East Wapella. *Oil and Gas Journ.*, vol. 62, n° 21, pp. 188-191.
- FOGLIERINI F. et BERNARD A. (1961). - Etude préliminaire du gisement de Largentière (Ardèche). *Mém. B.R.G.M.*, Paris, n° 15, Coll. Trias de France et des régions limitrophes, Montpellier, pp. 710-712, 1963.
- FOGLIERINI F., BRUTE de REMUR M., NAPOLY J. et TESTUT R. (1965). - Gisement de plomb et zinc de Largentière (Ardèche). *Ann. Mines*, Paris, pp. 391-410.
- FORTESCUE J. (1965). - Exploration architecture. *Geol. Surv. Canada*, Paper 65-6, pp. 4-14, tabl.
- FUCHS Y. (1963). - Contribution à l'étude géologique et métallogénique de la couverture sédimentaire du dôme de Vimenet (Aveyron). Thèse 3e cycle, Nancy, et *Sciences de la Terre*, t. IX, n° 3, pp. 235-291, 14 fig., 2 tabl.
- FULDA E. (1929). - Zum problem des Kupferschiefers. *Jarhb. preusz. Geol.*, L.A.f. 1928, 49, 2.
- FULTON R.B. (1950). - Prospecting for zinc using semi quantitative chemical analysis of soils. *Econ. Geol.*, Urbana, vol. 45, pp. 645-670.
- GERARDS J. et LADMIRANT H. (1960). - Les applications de la photographie aérienne à la géologie. *Bull. Soc. belge Photogrammétrie*, Annexe n° 62, déc. 1960, pp. 3-14.
- GERARDS J. et LADMIRANT H. (1963). - La photogéologie au service des travaux préliminaires à la mise en valeur des ressources minérales. *Conférence des Nations Unies sur l'application de la Science et de la Technique* (A 521), Genève, 1963, 16 p.
- GINZBURG I.I. (1957). - Principles of Geochemical prospecting. Trad. V.P. SOKOLOFF, Pergamon Press, London, Oxford, New-York, 1960, 1 vol., 311 p., 72 fig., 28 tabl.
- GOGUEL J. (1963). - La gravimétrie. *Coll. "Que Sais-je"*, n° 1030, Pr. Univ. Fr., 126 p.
- GRANGEON P. (1960). - Contribution à l'étude des terrains tertiaires, de la tectonique et du volcanisme du massif du Coiron (Sud-Est du Massif Central Français). *Trav. Lab. Géol. Grenoble*, t. 36, pp. 143-284, 20 fig., 20 pl., bibl.
- GRANIER C. (1958). - Mise en évidence de structures minéralisées par prospection microchimique tactique. *Chron. Mines Rech. min.*, Paris, n° 270, pp. 351-352.
- GRANIER C. (1960). - Aperçu sur la prospection géochimique du plomb et du zinc. *Bull. Soc. fr. Minéral.*, Paris, t. 83, n° 7-9, pp. 209-215.

- GRANIER C. (1962). - La terminologie des méthodes de prospections géochimiques. *Bull. Soc. fr. Minéral.*, Paris, t. 85, n° 1, pp. 11-14.
- GRILLOT H., BEGUINOT J., BOUCETTA M., ROQUETTE C. et SIMA A. (1964). - Méthodes d'analyses quantitative appliquée aux roches et aux prélèvements de la prospection géochimique. *Mém. B.R.G.M.*, Paris, n° 30, 1 vol., 225 p., 17 fig. bibl.
- GY P. (1964). - L'échantillonnage des minerais. Le principe d'équiprobabilité. *Ann. Mines*, Paris, pp. 779-794, 2 fig. bibl.
- HAMMER S., NETTLETON L.L. and HASTINGS W.W. (1945). - Gravity prospecting for chromite in Cuba. *Geophysics*, vol. 10, n° 1, pp. 34-49.
- HAWKES H.E. and WEBB J.S. (1962). - Geochemistry in mineral exploration. *Harper's Geoscience series*, New-York, 415 p., 181 fig., bibl.
- HINZE W.J. (1960). - Application of the gravity method to iron ore exploration. *Econ. Geol.*, Urbana, 1960, t. 55, n° 3, pp. 465-484.
- KANTAS K. (1965). - Analogous method for interpretation of gravitational anomalies. *Pure and Appl. Geophysics*, vol. 60, pp. 80-84.
- KNIGHT L. (1957). - Ore genesis. The ore bed concept. *Econ. Geol.*, Urbana, vol. 52, n° 7, pp. 808-817.
- LANGFORD F.F. (1965). - A method to evaluate the probability of success of a geochemical survey. *Econ. Geol.*, Urbana, vol. 60, pp. 360-372.
- LAUNAY (de) L. (1913). - Traité de métallogénie. Gîtes minéraux et métallifères. Paris et Liège, 3 t., 858 p., 801 p. et 934 p.
- LOVERING T.S., SOKOLOFF V.P. and MORRIS H.T. (1948). - Heavy metals in altered rock over blind ore bodies, East Tintic district, Utah. *Econ. Geol.*, Urbana, vol. 43, pp. 384-399.
- McCULLOH T.H. (1965). - A confirmation by gravity measurements of an underground density profile based on core densities. *Geophysics*, vol. 30, n° 6, pp. 1108-1132, 11 fig.
- MATHERON G. (1962). - Traité de géostatistique appliquée. *Mém. B.R.G.M.*, Paris n° 14 et 24, pp. 133 et 171, 62 fig.
- MILLER R.L. and GOLDBERG E.D. (1955). - The normal distribution in geochemistry. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, vol. 8, pp. 53-62.
- NAUDY H. et NEUMANN R. (1965). - Sur la définition de l'anomalie de Bouguer et ses conséquences pratiques. *Geophy. Prospecting*, vol. 13, n° 1, pp. 1-11.
- NOLAN T.B. (1936). - In mineral resources of the region around Boulder Dam. *U.S. Geol. Surv. Bull.*, Washington, n° 871, pp. 7-9.
- NOLAN T.B. (1950). - The search for new-mining districts. *Econ. Geol.*, Urbana, vol. 45, n° 7, pp. 601-608.
- PETTLJOHN F.J. (1963). - Data of Geochemistry. Chap. S, Chemical composition of sandstone excluding carbonate and volcanic sands. *Geol. Surv. Prof. Pap.* 440-S, pp. 1-19, bibl.
- PHAM VAN NGOC (1964). - Technique nouvelle de prospection gravimétrique par mesure directe des dérivées secondes verticales de l'intensité de la pesanteur. *Mém. Sciences de la Terre*, Nancy, n° 5, 192 p., 92 fig., 21 tabl.
- ROMAN F. (1934). - Sur un gisement de mammifères du Pliocène ancien à Mélias (Commune des Assions, Ardèche). *Bull. Soc. géol. Fr.*, Paris, t. IV, pp. 603-608.
- ROUTHIER P. (1963). - Les gisements métallifères. Géologie et principes de recherches. Paris, Masson et Cie, 2 vol., 1282 p., 411 fig.
- SAMAMA J.C. (1963). - Etude géologique des anomalies géophysiques de la zone DORI-Sud (Haute-Volta), *Rapport B.R.G.M.*
- SAMAMA J.C. (1966). - Sur la nature hétéropique des formations du Keuper, de l'Infralias et de l'Hettangien de l'Ardèche méridionale. *C.R. Acad. Sci*, Paris, t. 262, pp. 51-54.
- SHARKOV I.V., GLIKO O.A. (1956). - Geokhimicheskie metody poiskov rudnyh mestorozhdenii V Zarubezhnyh stranakh. *Razred i okh Nedr.* n° 3.

- SLICHTER L.B. (1955). - Geophysics applied to prospecting for ores. *Econ. Geol.*, Urbana, 50 th. Anniversary volume, Part II, pp. 885-969.
- VIGIER R. et MURARD R. (1956). - Les phases successives de la recherche minière. *Comm. Congr. Cent. Indust. minér., Rev. Indust. Minér.*, St-Etienne, n° sp. IR., pp. 19-26.
- YUNGUL S. (1956). - Prospecting for chromite with gravimeter and magnetometer over rugged topography in East Turkey. *Geophysics*, 1956, vol. 21, n° 2, pp. 433-454.

TABLE DES MATIÈRES

	Pages
RESUME.....	11
INTRODUCTION.....	13
APERCU GEOLOGIQUE.....	19
1 - Lithostratigraphie.....	19
2 - Tectonique.....	19
3 - Minéralisations.....	21
PREMIERE PARTIE : GRAVIMETRIE.....	23
A - INTRODUCTION.....	23
B - PRINCIPE ET METHODE.....	25
C - DENSITES.....	26
1 - Mesures.....	26
a) Méthode.....	26
b) Précisions et causes d'erreur.....	27
2 - Populations de densités.....	29
a) Echantillonnage.....	29
b) Spécification des distributions.....	30
c) Comparaison des distributions.....	31
d) Effet des métaux lourds.....	31
D - ETUDE DES STRUCTURES.....	33
1 - Méthodes.....	33
2 - Faille Malet.....	33
3 - Structure "Run".....	36
E - CONCLUSION.....	38
DEUXIEME PARTIE : GEOCHIMIE.....	41
A - PROBLEME ET METHODE.....	41
1 - Données géologiques.....	41
a) Phase de concentration.....	42
b) Phase de redistribution.....	42
c) Phase de dispersion.....	43

	Pages
2 - Travaux antérieurs.....	43
3 - Localisation du problème - But recherché.....	45
B - LES DONNEES CONCRETES DU PROBLEME : CAS DE LA CAMPAGNE DES ESTOURELS.....	45
1 - Formes du relief, végétation et sols.....	45
2 - Prélèvements.....	47
a) Maille.....	47
b) Prélèvements.....	47
3 - Analyse.....	47
4 - Contrôles et reports.....	48
5 - Interprétations classiques : les anomalies de fuite.....	49
6 - Faits non interprétés : mise en cause de l'interprétation.....	49
C - ESSAI D'ANALYSE DE LA CAMPAGNE DES ESTOURELS.....	49
1 - Distributions.....	52
a) Données numériques.....	52
b) Histogramme et courbes de densité de probabilité.....	53
c) Première interprétation.....	54
2 - Données complémentaires.....	56
3 - Interprétation des distributions.....	57
a) Décomposition des courbes.....	57
b) Probabilité d'appartenance d'une valeur.....	59
c) Coupures choisies - Cartes d'anomalies du type (II).....	60
d) Interprétation des anomalies sélectionnées.....	61
e) Anomalies et directions de fractures.....	66
f) Complément sur la signification de l'anomalie détectée.....	68
D - APPLICATION DES RESULTATS AU PERIMETRE DU MAS GAUTHIER.....	70
1 - Résultats du Mas Gauthier.....	70
2 - Vérifications directes.....	73
E - RETOUR SUR LE PROBLEME DE LA MAILLE.....	74
1 - Echantillonnage.....	74
2 - Identification.....	75
F - CONCLUSION.....	76
TROISIEME PARTIE : CONCLUSION.....	79
BIBLIOGRAPHIE.....	83

DEUXIEME THESE

Propositions données par la Faculté :

"Les gisements uranifères stratotides de l'Ouest des U.S.A. Leur position métallogénique".

Vu et approuvé
Nancy, le 26 mai 1966
Le Doyen de la Faculté des Sciences

J. AUBRY

Vu et Permis d'Imprimer
Nancy, le 27 mai 1966
Le Recteur, Président du Conseil de l'Université

P. IMBS.

IMPRIMERIE LOUIS-JEAN

Publications littéraires et scientifiques

TYPO - OFFSET

05 - GAP - Téléphone 14-23 14-24

Dépot légal n° 38 - 1968

